TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

JULIO - DICIEMBRE 2025 VOLUMEN 8 / NUMERO 2 ISSN: 2992-8338

EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLOGICO NACIONAL DE MÉXICO

cenidet®
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA. Volumen 8, Núm. 2, Julio -Diciembre 2025

Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo

Tecnológico Interior Internado Palmira s/n, C.P. 62490,

Cuernavaca,Morelos,México.https://tycap.cenidet.tecnm.mx, http://cenidet.tecnm.mx/

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA, es una publicación semestral editada por elTecnológico Nacional de México, Avenida Universidad 1200, Alcaldía Benito Juárez, C.P.03330, Teléfono 5536002511 Ext. 65092, correo d_vinculacion05@tecnm.mx, a través delCentro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Interior InternadoPalmira s/n, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México, Contacto: +(52)7773627770, vin_cenidet@tecnm.mx, www.cenidet.tecnm.mx. Editores Responsables: Dr.Ricardo Fabricio Escobar Jiménez y Dr. Carlos Daniel García Beltrán. Reserva deDerechos al Uso Exclusivo: No. 04-2023-072614555600-102,ISSN: 2992-8338, ambosotorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la últimaactualización de este Número, profesor-investigador del Centro Nacional de Investigacióny Desarrollo Tecnológico, Dr. Carlos Daniel García Beltrán, Interior Internado Palmira s/n,Colonia Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México. Fecha de últimamodificación,26 de junio de 2025.
Queda prohibida la reproducción parcial o total del contenido e imágenes de estapublicación en cualquier medio, sin previa autorización del Centro Nacional deInvestigación y Desarrollo Tecnológico.

ÍNDICE

Ciencias de la Ingeniería

01 Study and Coverage Analysis of a LoRa Transmission System at UNAM's University City for IoT Applications.

8 Measuring Energy, Water Consumption, and Carbon Footprint for each Query Generated by ChatGPT

15 Literature Review: Detection and Estimation of Foliar Severity in Tomato (Solanum lycopersicum)

21 Medical-AId, a platform for medical services assisted by mobile, web, and AI devices

28 An overview of cohesion metrics in microservices architectures

35 Graph Data Analysis Against Money Laundering

42 Comparative study of natural language processing algorithms for topic analysis in identifying issues faced by higher education students based on unstructured texts

50 Anomaly Detection in Heart Sounds Using Daubechies Wavelet Analysis and MFCCs Through Machine Learning Techniques

56 Evaluation of Fuzzy Systems for Soil pH Prediction in Papaya Crops

64 Intelligent Models for Predicting Phonological Development

72 TDS Sensor Analysis with Artificial Neural Network for Water Quality Evaluation7

80 Beyond Weight: A Machine Learning Approach for Exploring the Relevance of Additional Clinical Features in Hypothyroidism

88 Comparative study of natural language processing algorithms for topic analysis in identifying issues faced by higher education students based on unstructured texts

96 Autonomous Navigation System with Computer Vision and Fuzzy Logic for Mobile Robots using ESP32-CAM

103 Exploring the Use of Generative Artificial Intelligence to Support Requirements Specification in Software Engineering Education.

109 Comparative Study of Deep Learning Models for Mammographic Calcification Classification

117 Data Augmentation Techniques for Images Containing People: Review of Methods, Efficiency, and Practical Challenges

127 Artificial vision system for drowsiness and distraction detection in high-risk activities

135 Genetic Algorithm to Maximize the Strength of Microalloyed Steel

143 Fuzzy Inference Modeling for Estimation of Boarding and Alighting Times in Passengers with Limited Mobility

151 Comparative Performance Analysis of Raspberry Pi Pico and ESP32 Microcontrollers under Single- and Multi-Core Processing Conditions.

157 Compy: Intelligent Wearable System for Assisted Navigation in Visually Impaired Individuals

163 Automatic Design of a Simple Functional Neural Network

170 Identification of Type 2 Diabetes Subgroups by combining Graph Analysis and Unsupervised Machine Learning Algorithms in a Mexican Cohort

178 Intelligent Assistive System for the Early Detection and Mitigation of Hallux Valgus and Flat Foot Using Computer Vision

ÍNDICE

Ciencias de la ingeniería

184 Effect of Nanoemulsions for Improving .Postharvest Quality and Shelf Life of Papaya (Carica papaya L.), to Anthracnose Control (Colletotrichum gloeosporioides Penz and Sacc.)

190 Social, economic and environmental impact of blueberries

196 Evaluation of the antifungal effect of a zinc nanoparticle formulation (HMC) against Fusarium solani during germination and plant development of tomato (Solanum lycopersicum L.)

205 A Graphical User Interface in Octave for Pinch Point Analysis in Heat Exchanger Network Synthesis.

212 Treatment of Mezcal Vinasses for the Removal of Phenolic Compounds Using Adsorption-Desorption Processes.

220 Pricing strategies to improve the performance of rural microenterprises: a theoretical review.

227 Sustainable development: an analysis of global initiatives for access to STEM education in developing countries.

233 Management and Monitoring of Ardea Herodias in the Southern Zone of Tamaulipas.

240 Literature review of digital cognitive assessment for remote dementia detection.

247 The work skills present in engineering students of the Tecnológico Nacional de México.

255 Photocatalytic performance of sol–gel synthesized ZnO in methylene blue degradation under direct photocatalysis and photo-Fenton-like conditions.

263 1D-TiO2 thin films with CdS quantum dots for the production of solar fuels from greenhouse gases (CO2).

272 Amuzgo textile practice and sustainability in the State of Guerrero, Mexico.

279 Earthworm Humus: Biology, Technology, and Opportunities for a Sustainable Fertilizer.

287 Comparison of Beat-Based and Fixed-Window Segmentation for Phonocardiogram Classification with CNN

293 Characterization of vernacular materials: case of Adobe.

301 Innovative Technologies That Contribute to the Circularity and Sustainability of the Tourism Sector in Morelos.

308 The kilogram in the International System of Units: Defining Constants and their Implementation in Mexico.

315 Hybrid Architecture for Visual Pattern Detection in an Inspection System for the Filling of Cider Bottles.

322 Dynamic Drone Mesh Networks for Scalable Quantum Key Distribution in Challenging Environments.

330 Simulation of the chlorobenzene production process using DWSIM.

338 Sustainable Development: Analysis of Global Initiatives for Access to STEM Education in Developing Countries.

344 Energy analysis of reactive distillation for bioethanol dehydration using simulation in Unisim Design.

351 Thermal compensation of a Multimode-Interference-based fiber optic sensor for water quality measurements.

357 Strategies for Knowledge Management and Intellectual Property in Technological Innovation Projects under Industry 4.0 and 5.0 Contexts

ÍNDICE

Ingenieria Electrónica

367 Impact of Interconnect Crossings on the Performance of Rotary Traveling-Wave Oscillator Arrays

372 Prototype telematics system for vehicle security and tracking using an embedded system.

380 Clapp oscillator implementing Knowm memristors.

388 Frugal Prototype of an Autonomous Robot with Sensory Fusion and Bluetooth Communication.

396 Design and Modeling of Integrated Circuits for Environmental Sensing, Biomedical and Microfluidic Applications.

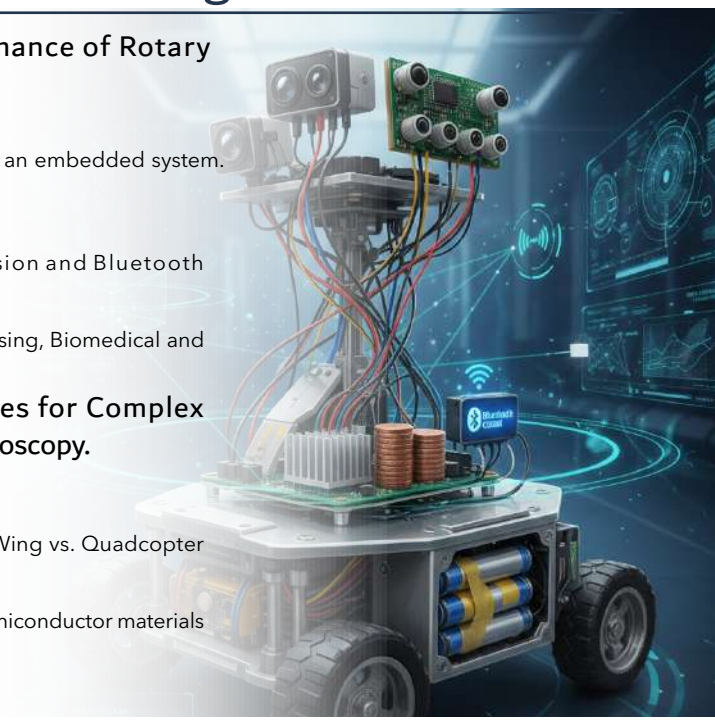
402 Comparative Evaluation of Four Digital Techniques for Complex Impedance Estimation in Electrical Impedance Spectroscopy.

413 Real-Time STFT on STM32H7 for Surface EMG Analysis.

421 Comparative Analysis of Solar Unmanned Aerial Vehicles: Fixed-Wing vs. Quadcopter Architectures.

428 Study and evaluation of a reaction chamber for heat treatments of semiconductor materials by electromagnetic induction.

435 Review of Current Trends for Battery Charging Systems.



Ingenieria Mecánica

443 Self- Sustaining Hybrid Wind-Solar Power System with Lithium-Ion Batteries for Residential Applications.

450 Study of the Energy Behavior of Social Housing Through the use of Energyplus.

455 Micro-scale wind assessment with commercial UAVs and IoT sensors for comfort and environmental management.

464 Temperature profile in heat sink used in thermoelectric modules.

Mecatrónica

470 Mechanical Design of Aquatic Robot Applied to Collect Solid Waste in Lake Areas of CDMX.

479 Parameterization and Quadratic Linear Regulator with Complementary Filter of Self-Balancing Robot.

486 Kinematic modeling, simulation, and validation of a 4-DOF robotic manipulator in ROS2.

494 Stress and Strain Analyzer to improve the teaching-learning process of Mechatronics Engineering.

Otras Ingenierias

500 Development of a portable device for in situ monitoring of settleable solids in industrial wastewaters.

506 Design and implementation of a balanced scorecard in a human capital services company: The Be Group case study.

512 Comparación de sales férricas en el proceso foto-Fenton solar para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil.

ÍNDICE

519 Evaluation of Tomato (Solanum lycopersicum L.) Hydroponic Effluents as a Growth Medium for the Propagation of Azolla (Salviniaceae).

526 Artificial Wetland as Ecotechnology in the Wastewater Treatment Plant (WWTP) using AutoCAD.

534 Adaptation of an Internal Combustion Engine for the Generation of Electric Power Using Biogas Obtained from Agricultural Biomass.

541 Comparison of Spectral Representation as Inputs in Multistream Convolutional Neural Networks for Musical Genre Classification.

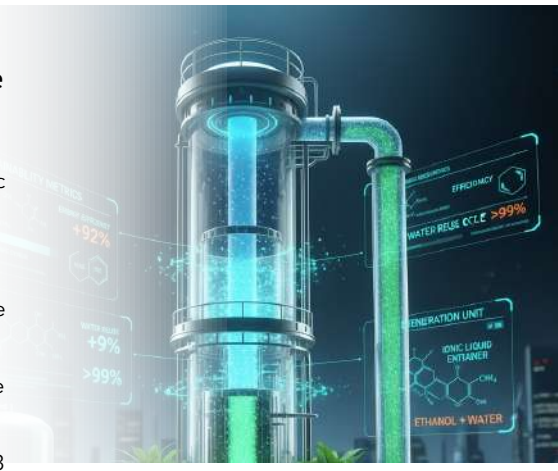
548 Implementation of algorithms for data extraction and classification in electrocardiograms.

556 Identification and control of a binary distillation column for an azeotropic mixture.

564 Impact of an Aloe vera-Based Coating on the Postharvest Preservation of Raspberries: A Study on Centennial and 1473 Varieties.

571 Simulation of the separation process of biotechnological 2-Phenylethanol using UniSim Design R500.

580 Implications of Slaughterhouse Wastewater: A Socio-environmental Perspective.



586 Integrating Advanced Imputation and Genetic Algorithms to Enhance Ovarian Classification.

596 Sustainable assessment of extractive distillation for ethanol dehydration using ionic liquids as entrainers.

603 Metabolic Biomarkers for Classification of Type 2 Diabetes Using Machine Learning.

611 Evaluation of the acceptance of a new snack-type product (churros) made from pulque agave flour (Agave salmiana)

615 Improvements in Asexual Propagation of Stevia rebaudiana Bertoni Through the Use of Biostimulants in Michoacan, Mexic

621 Structural analysis and evaluation of the magnetic performance of the LaCaMnO3 ceramic

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

JULIO-DICIEMBRE 2025
Publicado por CENIDET

VOLUMEN 8 / NÚMERO 2 ISSN: 2992-8338

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

REVISTA DIGITAL

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Volumen 8 · Número 2

La revista digital **"Tecnología y ciencia aplicada" del Tecnológico Nacional de México/**CENIDET, como parte de su responsabilidad con la sociedad mexicana y de la divulgación científica de los conocimientos más actuales generados en diversas áreas científicas aplicadas en beneficio de la sociedad, presenta el **volumen 8, número 2.**

En esta edición, los lectores encontrarán temas en cinco ejes principales: Ciencias de la Ingeniería, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Mecatrónica, y Ciencias Computacionales con temáticas como Energía y Cambio Climático, Agentes Tóxicos y Procesos Contaminantes, Cultura, Soberanía Alimentaria, Educación, Salud, Seguridad Humana, Sistemas Socioecológicos y Sustentabilidad, Vivienda y Movilidad.

> La revista digital "Tecnología y ciencia aplicada" se mantiene como un referente en promover que la ciencia sea para todos y un puente de comunicación entre la comunidad científica y la sociedad

Enmarcando las temáticas de la revista a la atención de los Programas Nacionales Estratégicos. En la revista se presentan un total de 84 artículos que fueron evaluados por el comité editorial de la revista para asegurar la calidad de cada uno de los artículos.

http://tecnologiaycienciaaplicada.cenidet.tecnm.mx

Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Interior Internado Palmira s/n, C.P. 62490, Cuernavaca,Morelos,México.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Editores Responsables

Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
Editor en Jefe

Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Editor ejecutivo

Mtro. Ramón Jiménez López
Director General del Tecnológico Nacional de México
Lic. Lorenzo O. Hernández
Director del TecNM/Centro Nacional de Investigación yDesarrollo Tecnológico
Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
SubdirectorAcadémico
C.P. Erika Yaneli Bahena Flores
Subdirección de Planeación y Vinculación
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Subdirección de Servicios Administrativos
Dr. NoéAlejandro Castro Sánchez
Departamento de Ciencias Computacionales
Dr. Jarniel García Morales
Departamento de Ingeniería Electrónica
Dr. Andrés Blanco Ortega
Departamento de Ingeniería Mecánica
Dr. Jesús Arce Landa
Coordinación del ngenierías
Dr. Erik Rosado Tamariz
Coordinación de Mecatrónica
Dra. Rodolfo Amalio Vargaz Méndez
Departamento de Desarrollo Académico e Idiomas
Mtro. Emanuel Olmos Barba
Departamento de Organización y Seguimiento de Estudios
Mtra. Cecilia López Romero
Oficina de Centro de Cómputo y Telecomunicaciones
M.A. Daniela Hernández Castañeda
Centro de Información
Mtra. Maritza De La Sancha San Román
Departamento de Planeación

Programación y Presupuestación

Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Departamento de Gestión Tecnológica y Vinculación
Dr. Vitervo López Caballero
Departamento de Comunicación y Eventos
Mtra. Verónica Sotelo Boyás
Departamento de Servicios Escolares
Ing. Christopher Garduño Corona
Departamentode Recursos Materiales y Servicios
M.A. Silvia Muñoz Moreno
Departamento deRecursos Humanos
Mtra. Honoria Martínez Pérez
Departamento Recursos Financieros.

Consejo Editorial
Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez -Editor en Jefe
Dr. Carlos DanielGarcía Beltrán -Editor Ejecutivo
Dr. Arturo Abúndez Pliego -Editor Asociado
Dr. Andrés Blanco Ortega -Editor Asociado
Dr. Erik Rosado Tamariz -Editor Asociado
Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda -Editor Asociado
Dr. Gabriel González Serna -Editor Asociado
Dr. Dante Mújica Vargas -Editor Asociado
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo -Editora Asociada
Mtra. Nayeli Hernández Barba -Editora Asociada
Dr. Rodolfo Vargas Méndez -Editor Asociado
Dra. Marisol Cervantes Bobadilla -Editora Asociada.

Diseño y edición:
D. G. Luis Fernando García B.

Comité de Arbitraje:
Miguel Alvarado Flores, BUAP; Hugo Arnoldo Mitre Hernández, CIMAT; Mariana Gisela Peña Juárez, TecNM/CRODE_O; Héctor Miguel Buenabad Arias, CIICAp-UAEM; Susana Silva Martínez, CIICAp-UAEM; José Alfredo Hernández Pérez, CIICAp-UAEM; Gabriela Hernández Luna, CIICAp-UAEM; Víctor Manuel Zezatti Flore, CIICAp-UAEM; Mario Andrés Aguilar Orduña, CINVESTAV; José Hugo Arellano, ENES Juriquilla; Jesús Emmanuel Solís Pérez, ENES Juriquilla; Katya Rodríguez Vázquez, IIMAS, UNAM; Ana Odilia Martínez Hernández, IMSS; Sandra Eloisarangel Estrada, INIFAP; Lucero De Montserrat Ortiz Aguilar, TecNM/ITSPR; Jorge Misael Ruiz Martínez, TecNM/ITAO; Julio César González Juárez, TecNM/ITMor; Eliel Rafael Romero García, TecNM/ITMor; Héctor Ramón Azcaray Rivera, TecNM/ITOx; Giner Alor Hernández, TecNM/ITOz; Fredy Juárez Trujillo, TecNM/ITSA; Eligio Flores Rodríguez, TecNM/ITSI; Wendy Guadalupe Báez García, TecNM/ITSM; Javier Uriarte Flores, TecNM/ITST; Alfredo De La Barrera González, IPN; Edgar Alfredo Portilla Flores, IPN; Paola Andrea Niño Suárez, IPN; Jorge Bedolla Hernández, TecNM/ITA; Isay Obet Huicochea Ríos, TecNM/CENIDET; Máximo López Sánchez, TecNM/CENIDET; Abisai Acevedo Quiroz, TecNM/CENIDET; Alfredo Terrazas Porcayo, TecNM/CENIDET; Alicia Martínez Rebollar, TecNM/CENIDET; Andrea Magadán Salazar, TecNM/CENIDET; Andrés Blanco Ortega, TecNM/CENIDET; Ángel Rodrigo Guadarrama Estrada, TecNM/CENIDET; Antonio Juan Capistran Abundez, TecNM/CENIDET; Aristides Caballero Alfaro, TecNM/CENIDET; Arturo Abúndez Pliego, TecNM/CENIDET; Arturo Daniel Espinosa Pedroza, TecNM/CENIDET; Blanca Dina Valenzuela Robles, TecNM/CENIDET; Blanca Lucero Xopo Rodríguez, TecNM/CENIDET; Carlos Daniel García Beltrán, TecNM/CENIDET; Carlos Manuel Astorga Zaragoza, TecNM/CENIDET; Daniela Hernández Castañeda, TecNM/CENIDET; Dante Mujica Vargas, TecNM/CENIDET; Eddie Helbert Clemente Torres, TecNM/CENIDET; Efraín Simá Moo, TecNM/CENIDET; Eladio Martínez, TecNM/CENIDET; Elías Ramos, TecNM/CENIDET; Emmanuel Olmos Barba, TecNM/CENIDET; Enrique Alcudia Zacarías, TecNM/CENIDET; Erik Rosado Tamariz, TecNM/CENIDET; Ezequiel Domínguez Lagunas, TecNM/CENIDET; Fredi Alegría, TecNM/CENIDET; Gerardo Vicente Guerrero Ramírez, TecNM/CENIDET; Gloria Lilia Osorio Gordillo, TecNM/CENIDET; Iván Antonio Juárez Trujillo, TecNM/CENIDET; Jarniel García Morales, TecNM/CENIDET; Javier Ortiz Hernández, TecNM/CENIDET; Jesús Darío Mina Antonio, TecNM/CENIDET; Jorge Colín Ocampo, TecNM/CENIDET; Jorge Alberto Fuentes Pacheco, TecNM/CENIDET; José Luis Rodríguez Pliego, TecNM/CENIDET; Juan Carlos Rojas Pérez, TecNM/CENIDET; Juan Gabriel González-Serna, TecNM/CENIDET; Karime Baltazar Alcaraz, TecNM/CENIDET; Ma. Del Carmen Toledo Pérez, TecNM/CENIDET; Ma. Guadalupe López López, TecNM/CENIDET; Manuel Adam Medina, TecNM/CENIDET; María Fernanda De Jesús Ramírez, TecNM/CENIDET; Mario Ponce Silva, TecNM/CENIDET; Marisol Cervantes Bobadilla, TecNM/CENIDET; Marisol Coba Martínez, TecNM/CENIDET; Miguel Chagolla Aranda, TecNM/CENIDET; Mónica Borunda Pacheco, TecNM/CENIDET; Nayeli Del Milagro Hernández Barba, TecNM/CENIDET; Noé Alejandro Castro Sánchez, TecNM/CENIDET; Rafael Campos Amezcua, TecNM/CENIDET; Raúl Pinto Elías, TecNM/CENIDET; René Santaolaya Salgado, TecNM/CENIDET; Reynaldo Ángel Serrano Cruz, TecNM/CENIDET; Ricardo Fabricio Escobar Jiménez, TecNM/CENIDET; Rodolfo Amalio Vargas Méndez, TecNM/CENIDET; Roger Alejandro Cundapí Arroyo, TecNM/CENIDET; Samanta López Salazar, TecNM/CENIDET; Sara Lilia Moya Acosta, TecNM/CENIDET; Semadar Bojórquez Sánchez, TecNM/CENIDET; Vicente Borja Jaimes, TecNM/CENIDET; Víctor Hugo Olivares Peregrino, TecNM/CENIDET; Víctor Josué Ruiz Martínez, TecNM/CENIDET; Víctor Manuel Alvarado Martínez, TecNM/CENIDET; Víctor Miguel Salinas Cortés, TecNM/CENIDET; Vitervo López Caballero, TecNM/CENIDET; Yasmín Hernández, TecNM/CENIDET; Yvonne Chávez Chena, TecNM/CENIDET; Arturo Alvarado Lassmann, TecNM/CRODE_O; Melina Velasco Plascencia, TecNM/ITM; Cecilia Irene Loeza-Mejía, TecNM/ITM; Edgar Omar Bañuelos Lozoya, TecNM/ITP; Cruz Ernesto Aguilar Rodríguez, TecNM/ITSLR; Demetrio Pérez Vigueras, TecNM/ITSOEH; Luis Enrique Calatayud Velázquez, TecNM/ITT; Macdiel Emilio Acevedo Quiroz, TecNM/ITZ; Areli Marlen Salgado Delgado, TecNM/ITZ; Arturo Javier Martínez Mata, TecNM/ITZ; Enrique De Jesús Moreno Carpintero, TecNM/ITZ; Erika Darnely Rojas Ayala, TecNM/ITZ; Iris Lizeth Hernández Solís, TecNM/ITZ; Wendy Netzy Hernández Díaz, TecNM/ITZ; Zully Vargas Galarza, TecNM/ITZ; Israel Isaac Zetina Ríos, TecNM/SMA; Jorge Edmundo Mastache Mastache, TecNM/TESJ; Luis Felipe Rivas Mendoza, TecNM/ITSTII; Julia Patricia Melo Morin, TecNM/ITSP; Noel García Díaz, TecNM/ITC; Rocío Ramos Hernández, TecNM/ITO; Miriam Antonia Chavarría Santibáñez, TecNM/ITZ; Ángel Tlatelpa Becerro, UAEM; Dolores Azucena Salazar Piña, UAEM; Miriam Navarrete Procopio, UAEM; Raquel Sotelo Urueta, UAEM; Alejandra Guadalupe Silva Trujillo, UASLP; Pedro Cruz Alcantar, UASLP; Felipe Noh Pat, UAC; Julia Yazmín Arana Llanes, UAH; María Del Rocío Ochoa Montiel, UAT; Jorge Aurelio Brizuela Mendoza, UdeG; María Susana Ávila García, UdeG; Irving Osiris Hernández López, UdeS; Manuel De Jesús Palacios Gallegos, UPC; María De Los Ángeles Cosío León, UPP; Miguel Ángel Ruiz Jaimes, UPEM; Luis Guillermo Carreto Hernández, UTGZ; Esther Lugo González, UTM; Miguel Alberto Domínguez Gurría, UTM; Roberto Alvarado Juárez, UTCV; César Humberto Guzmán Valdivia, UPA; Cristina Blanco González, UPC; Yadira Toledo Navarro, UPEM; Yessenia Olazo Gómez, USon; Eduardo Javier Cortés Zetina, UTCV; Iván Alcalá Borjas, UTEZ; Camilo Leonardo Sandoval Rodríguez, UTS; Carlos Manuel Lara Barrios; Juan José Acevedo Fernández; Leonor Zavaleta Avejar.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Study and Coverage Analysis of a LoRa Transmission System at UNAM's University City for IoT Applications.

R. Travieso-Valdés*, L. J. Olvera-Acevedo, M. A. Hernández-Flores*, D. E. Ceballos-Herrera, R. Gutiérrez-Castrejón**, V. Rangel-Licea*,**

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México

**Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México*

(e-mail: rtravieso91@gmail.com, jesusolac@outlook.com)

Abstract: In this paper, we analyze the coverage of a LoRaWAN transmission system in the surroundings of the Central University City Campus of the Universidad Nacional Autonoma de México (UNAM) in Mexico City. The purpose is to study how the LoRa network performs in an environment that includes wooded areas, several buildings, and direct line-of-sight zones, ensuring optimal transmission parameters to assess the feasibility of future IoT application deployments. We also describe the procedure and components employed in the implementation of the LoRaWAN network in order to provide a guide to replicate this system in other campus with similar forest and building distribution. Our study considers the measurement and analysis of the received signal strength indicator (RSSI) and the packet error rate (PER) at different locations of the campus. Our results indicate that the RSSI and PER are affected firstly by wooded areas, and secondly by the reflections caused by buildings. The wooded areas reduce the RSSI levels at least 10 dB in comparison to this measured in line-of-sight zones. These results contribute with valuable information for the development and optimization of LoRaWAN networks implemented in places with combined forest and urban areas.

Keywords: Coverage analysis, LoRa transmission system, Signal reception.

1. INTRODUCCIÓN

LoRa es una tecnología de modulación de radiofrecuencia (RF) diseñada para redes de área amplia de bajo consumo energético (LPWAN). El término "LoRa" (Long Range), hace referencia al amplio alcance de los enlaces de datos que esta tecnología facilita. En particular, la Tecnología LoRa permite comunicaciones a larga distancia: hasta cinco kilómetros en zonas urbanas y hasta más de 15 kilómetros en áreas rurales, siempre considerando en todos los casos condiciones de línea de vista entre el nodo transmisor y la antena receptora (Electronic Design, 2023a). Una de las principales ventajas de LoRa es su bajo consumo de energía, lo que posibilita la creación de dispositivos o nodos transmisores que pueden ser alimentados por baterías y que pueden funcionar hasta por 10 años. Al implementarse en una topología en estrella, una sola antena receptora puede recibir datos de al menos 1000 nodos transmisores. En estos casos se agregan protocolos de direccionamiento de red y contraseñas de inicio de sesión en la transmisión de los nodos transmisores hacia la antena receptora, lo cual da surgimiento a la red LoRaWAN o Long Range Wide Area Network (Red de Área Amplia de Largo Alcance) (Electronic Design, 2023a). LoRaWAN es ideal para aplicaciones que requieren comunicaciones de largo alcance o dentro de edificios, donde se conectan numerosos dispositivos con bajo consumo energético y que generan pequeñas cantidades de datos. Basado en LoRa, las tecnologías esenciales de LoRaWAN se fundamentan en los mismos protocolos de estándares abiertos que utiliza Internet, específicamente TCP/IP. Esto permite que las soluciones basadas en LoRaWAN sean compatibles con tecnologías de Internet, incluyendo diversos servicios en la nube, y se integren sin complicaciones con otros medios de comunicación, como satélite, redes celulares, Wi-Fi y Bluetooth (Chen et al., 2020). Al emplear estándares abiertos, se asegura que tanto proveedores como usuarios no dependan de un solo fabricante y que sus decisiones sean sostenibles a largo plazo. Gracias a su diseño basado en estándares abiertos, el protocolo LoRaWAN puede aprovechar protocolos establecidos y eficaces, como la multidifusión IP. Esto facilita la implementación de redes de sensores y control sin la necesidad de realizar grandes inversiones en infraestructura o en desarrollo de ingeniería. Este protocolo transmite en bandas de frecuencias ISM (bandas de radio industriales, científicas y médicas) (Electronic Design, 2023a; 2023b; Acevedo, 2025). LoRaWAN fue específicamente creado para cumplir con los requisitos del Internet de las Cosas (IoT), permitiendo comunicaciones bidireccionales, seguridad de extremo a extremo, servicios de localización y soporte para la movilidad. Además, LoRaWAN opera en frecuencias menores a 1 GHz, lo que permite que los radios de baja potencia utilicen transmisores con un consumo mínimo para lograr comunicaciones de largo alcance de forma bidireccional, pero no se ha abordado cómo se comporta la señal LoRa cuando estos ambientes se presentan en forma simultánea, como es el caso del Campus de Ciudad Universitaria de la UNAM en la Ciudad de México. En ese sentido, la contribución principal del presente trabajo radica en analizar cómo las características

boscosas y de obstáculos de entornos urbanos que presenta en conjunto el campus de Ciudad Universitaria puede afectar el rango de cobertura máximo de una red LoRa y cómo este análisis puede ser tomado como referencia para interconectar múltiples sensores colocados en diferentes puntos de Ciudad Universitaria, y con ello diseñar sistemas IoT eficientes y optimizados dentro del Campus.

2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

2.1 Diseño de Red

En este trabajo se plantea el desarrollo de una plataforma de comunicación inalámbrica basada en la tecnología LoRaWAN de largo alcance, la cual está caracterizada por su bajo costo y eficiencia energética. Así como realizar un estudio de cobertura de varios puntos alrededor de Ciudad Universitaria que presentan entornos tanto boscosos como urbanos y exponer los resultados de las mediciones adquiridas en cuestión de la intensidad de la señal inalámbrica recibida a través de la red (RSSI) y la tasa de pérdidas de paquetes transmitidos (PER).

La arquitectura LoRaWAN se fundamenta en una topología de estrella, donde se interconectan los nodos finales, las antenas receptoras, también denominadas gateways, y los servidores de red (Electronic Design, 2023a; Morales-Alvarez et al., 2023). Cada nodo transmite sus mensajes a los servidores a través de los gateways. Un gateway tiene la capacidad de decodificar hasta 1000 transmisiones simultáneas en diferentes canales y con diversas tasas de modulación. Posteriormente, el gateway envía estos mensajes a un servidor de red mediante Internet (Electronic Design, 2023b, Gopinath et al. 2022). En particular, esta configuración de topología en estrella es la que se ha utilizado para el diseño de la red.

Para describir este diseño de forma más detallada se analiza la arquitectura mostrada en la Figura 1, la cual consta de cuatro componentes clave: dispositivos finales (nodos), gateways (puertas de enlace), un servidor de red (network server) y un servidor de aplicaciones (application server) (Electronic Design, 2023b).

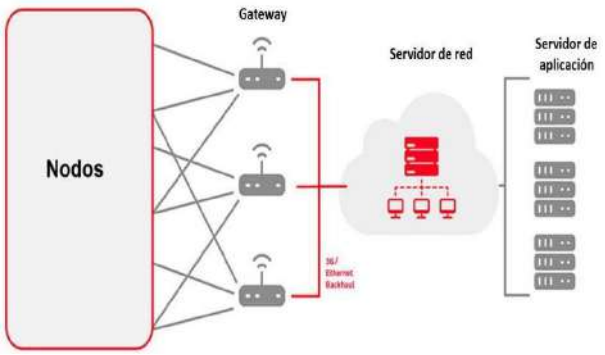


Figura 1. Arquitectura de una red LoRaWAN (Electronic Design, 2023b, Morales-Alvarez et al., 2023).

A continuación, se describen las componentes principales:

1. Dispositivos transmisores (nodos): Estos dispositivos son módulos transmisores que cuentan con sensores, software y radios LoRa, lo que les permite captar información generada por los sensores y transmitirlas a una o más antenas receptoras *gateways*, que corresponde a la siguiente componente de la arquitectura.

2. *Gateways* (Puertas de Enlace): Estos dispositivos reciben la información enviada por los dispositivos finales. Mediante un proceso de autenticación, establecen la conexión con los sensores y luego dirigen la información hacia un servidor de red.

3. Servidor de Red (Network Server): Este componente recopila y gestiona los datos enviados por los *gateways* mediante protocolos como MQTT (Zhu et al., 2010). También optimiza la comunicación al seleccionar el mejor factor de propagación para los nodos y, en algunos casos, decodifica parte de la información. Su propósito principal es organizar los datos para su correcto procesamiento y visualización.

4. Servidor de Aplicaciones (Application Server): Generalmente alojado en la nube, este servidor actúa como la plataforma donde los datos de los sensores se visualizan en tiempo real. Además, almacena registros históricos de la información, facilitando análisis y consultas posteriores.

2.2 Implementación

Para el montaje de la red LoRaWAN se utilizaron las siguientes componentes con sus respectivas especificaciones:

1. Como primer componente se tiene el nodo o dispositivo transmisor mostrado en la Figura 2. En particular se usó el módulo transmisor LoRa: CubeCell – AB01 Dev-Board (V2) (HELTEC Automation, s.f.-a)

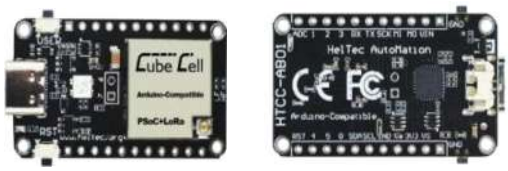


Figura 2. Módulo CubeCell – AB01 Dev-Board (V2), vista anterior y posterior (HELTEC Automation, s.f.-a).

Este módulo trae incluida una antena modelo Glue Rod modelo IPEX-1 indicada en la Figura 3, con una ganancia de 3dBi.

Figura 3. Antena tipo Glue Rod y sus dimensiones (HELTEC Automation, s.f.-c).

También se utilizó una segunda antena diferente a la que viene con el módulo CubeCell. En este caso se usa la antena VERT900 presentada en la Figura 4. Esto se realizó con el

objetivo de comparar los valores de los parámetros obtenidos, ya que esta antena provee una mayor ganancia de hasta 5dBi:

Figura 4. Antena VERT900.

El nodo o módulo transmisor LorRaWAN implementado para el desarrollo del proyecto se puede observar en la Figura 5.

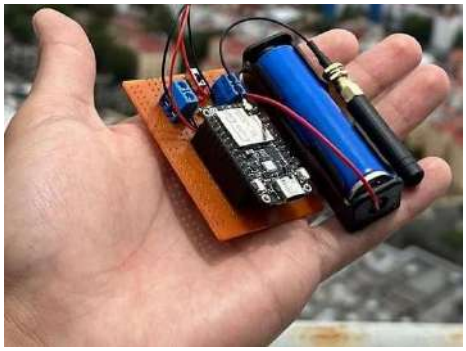


Figura 5. Módulo transmisor Lora con antena IPEX-1 y alimentado con una batería de litio con un voltaje de 3.7 V y 2000 mAh.

A dicho módulo se le pueden conectar sensores en sus puertos de entrada con el objeto que la señal proveniente del sensor pueda ser transmitida inalámbricamente mediante el protocolo LoRaWAN hacia la antena receptora Gateway. Estos módulos transmisores al ser de bajo consumo energético pueden ser instalados en lugares remotos del campus donde no hay instalaciones eléctricas debido a que fácilmente pueden ser alimentados por baterías o celdas solares.

2. Como segundo componente del sistema se utilizó el gateway HT-M02 Edge LoRa Gateway (V2) el cual se puede visualizar en la Figura 6 (HELTEC Automation, s.f.-b).

Figura 6. Gateway utilizado para la red LoRaWAN (HELTEC Automation, s.f.-b).

Este Gateway es para uso en exteriores con una protección IP66. La carcasa de aluminio asegura que todo el equipo no solo tenga en cuenta las características de disipación de calor, sino también una buena resistencia mecánica. También puede configurarse usando una página web local y puede conectarse a varios servidores de red, como Heltec SnapEmu IoT Hub, TTN, y ChirpStack.

Adicionalmente, la antena observada en la Figura 7 es la que se utilizó en el gateway. Esta antena utiliza conectores tipo N a SMA y ofrece una ganancia de 8 dBi, y se sujetó mediante un tubo de PVC de 3 metros en el techo de un edificio de la Facultad de Ingeniería (ver Figura 8), alcanzando una altura de 18 metros desde el piso hasta la antena aproximadamente.

Figura 7 Antena Gateway.

Figura 8. Colocación Antena del Gateway

Además, la alimentación eléctrica del Gateway se realizó mediante Power over Ethernet (PoE), utilizando un cable de red Ethernet de categoría 6 con una longitud aproximada de 50 metros, la cual se se conectó a un switch existente en un nodo del último piso del edificio Q, y que tiene compatibilidad con PoE y además brinda una salida a internet para que permita su asociación con el siguiente componente de la arquitectura que es el servidor de red y de esta forma se puedan almacenar los datos recibidos.

3. Como tercer elemento se utiliza un servidor de red. En particular se usó el servidor de red que ofrece la empresa que fabrica el *gateway* el cual se denomina The Things Network (TTN), que es un ecosistema global colaborativo de Internet de las Cosas que crea redes, dispositivos y soluciones utilizando LoRaWAN. Con este servidor se realiza el consecuente estudio de cobertura.

Normalmente una red LoRaWAN está compuesta también por una cuarta componente que se refiere a un servidor de

aplicación o Application Server, pero para el estudio que nos concierne el considerar solamente el Network Server es suficiente para hacer nuestro análisis, ya que de este mismo se puede extraer la información necesaria como el RSSI y el PER, que son los indicadores que se consideran para medir la potencia de la señal recibida y la tasa de pérdidas de paquetes de datos transmitidos inalámbricamente entre el nodo transmisor LoRa y el gateway.

3. ANÁLISIS DE COBERTURA

Lo primero que debe tomarse en cuenta para la realización del estudio, es que no es necesario conectar ningún tipo de sensor físico en el nodo, ya que solo se requiere la información de potencia de señal recibida y la cantidad de paquetes recibidos y perdidos en la transmisión entre el nodo LoRa y el gateway. Para ello se programó a los nodos de trasmisión LoRa Cubecell-AB01 a través del sistema Arduino para que transmitiera un número de paquetes de datos arbitrarios hacia el gateway. En forma adicional se le agregó un contador al código de transmisión de los nodos LoRa para que se transmitieran 100 paquetes en cada punto de estudio. En este sentido, la función del contador es ir incrementando el número del paquete que se transmite, desde 1 hasta llegar a 100, así en el servidor de red se procede a registrar cada paquete que recibe con su número correspondiente, por lo tanto, en el servidor, cada vez que faltaba un número, significaba un paquete perdido.

El estudio se realizó tomando en cuenta 13 puntos estratégicamente distribuidos alrededor del gateway LoRaWAN tal como se puede apreciar en la Figura 9, con el objetivo de cubrir un perímetro de 831 m.

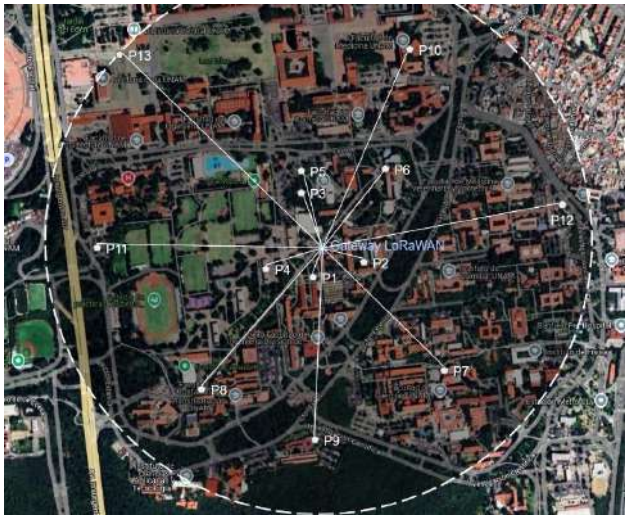


Figura 9. Distribución de los puntos del estudio de cobertura en la Ciudad Universitaria.

Cada uno de los puntos mostrados en la Figura 10 representa un escenario particular en la comunicación LoRa, abarcando áreas urbanas (con edificios interpuestos o dentro de ellos), zonas rurales (con vegetación como árboles y plantas), y áreas con o sin línea de vista hacia el gateway.

El gateway se colocó en la azotea del edificio Q "Luis Valdez Vallejo" de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, en su Conjunto Norte (punto central de la Figura 9) en las coordenadas 19.328094972153828, -99.18236007258757. La mayoría de los puntos fueron en exteriores a edificaciones, exceptuando el punto 2 y 10 que fueron en el sótano de edificios. Además, cabe mencionar que la segunda medición del punto 13, que fue detrás de un edificio de la Biblioteca Central de la UNAM (con coordenadas 19.33361, -99.18722), fue justo a la salida de la misma, por lo que se podría tomar como un punto interior en lo que al estudio se refiere.

Las mediciones se realizaron utilizando los dos tipos de antenas previamente mencionadas en el nodo transmisor LoRa, una que viene con el Cubecell o nodo, tipo Glue Rod y la otra VERT900.

El uso de las antenas influye significativamente en la comunicación. En las pruebas realizadas, la antena Glue Rod con una ganancia de 3 dBi demostró ser igual de eficaz que la antena VERT 900 de 5 dBi en distancias menores a 300 metros en exteriores. Sin embargo, en interiores de edificaciones y para distancias mayores a 300 metros, la antena VERT 900 resultó ser más efectiva (Acevedo, 2025). Esto se debe a que, en los puntos interiores, existen mayor cantidad de barreras físicas entre el nodo transmisor y el gateway receptor, por lo que hay necesidad de transmitir la señal con mayor potencia, siendo esta la razón del porque la antena VERT900 con mayor ganancia se comporta mejor en estos escenarios.

Ejemplo de esto se puede observar en la Figura 10, donde se hace una comparativa en un mismo punto de ambas antenas utilizadas. Este corresponde al punto exterior 3 y está a una distancia menor a 300 metros. Aquí se relaciona el RSSI con el envío continuo de paquetes y se puede observar que el RSSI es muy similar, beneficiado levemente con la antena VERT900 y sin ningún paquete perdido a diferencia de 3 paquetes que se pierden con la antena Glue Rod.

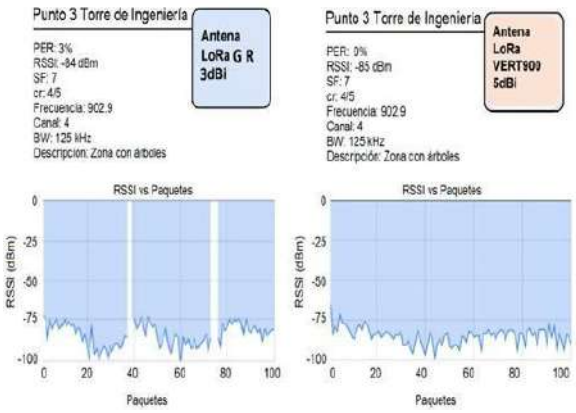


Figura 10. Comparación de uso de antenas dentro de 300 metros en un punto en el exterior a las edificaciones. (Acevedo 2025)

Analizando el RSSI promedio en cada punto de estudio, se evidencia que la antena VERT900 ofrece un rendimiento superior, pero la antena Glue Rod también arroja resultados muy satisfactorios y es muy conveniente dado que viene incluida con el módulo Cubecell utilizado, estos datos quedan registrados en la Tabla 1 para la antena Glue Rod y la Tabla 2 para la antena VERT900.

Tabla 1. Mediciones RSSI promedio utilizando antena Glue Rod.

Antena LoRa Glue Rod 3dbi				
Punto #	Nombre	Distancia m	RSSI d	Descripción
1	Zona de comida anexo de ingeniería	89	-80	Un edificio en la línea directa al gateway
2	Edificio 12 ingeniería.	141	-99	Sótano del edificio
3	Torre de ingeniería zona boscosa	170	-84	En línea de vista
4	Frontón cerrado	190	-89	Detro del frontón
5	Cibarium	250	-90	En línea de vista
6	IIMAS	293	-90	Con línea de vista
7	Biblioteca Facultad de Ciencias	465	-91	con edificios en la línea de vista
8	Trabajo social	485	-98	En línea de vista
9	Posgrado de contaduría	570	-87	Sin edificios en línea de vista
10	Facultad de Medicina	592	-105	Sótano del edificio
10	Facultad de Medicina	592	-96	Delante del edificio
11	Consejos académicos	626	-94	No hay ningún obstáculo relevante
12	Posgrado de odontología	730	-97	Tres edificios en línea de vista
13	Biblioteca central	831	-97	Delante del edificio
13	Biblioteca central	831	-103	Detrás del edificio
14	Colonia Ajusco	2730	-107	Larga distancia

Tabla 2. Mediciones RSSI promedio utilizando antena VERT 900.

Antena LoRa VERT900 5dbi				
Punto #	Nombre	Distancia m	RSSI	Descripción
1	Zona de comida anexo de ingeniería	89	-72	Un edificio en la línea directa al gateway
2	Edificio 12 ingeniería.	141	-97	Sótano del edificio
3	Torre de ingeniería zona boscosa	170	-85	En línea de vista
4	Frontón cerrado	190	-86	Detro del frontón
5	Cibarium	250	-86	En línea de vista
6	IIMAS	293	-81	Poca vegetación
7	Biblioteca Facultad de Ciencias	465	-84	Con edificios en la línea de vista
8	Trabajo social	485	-91	En línea de vista
9	Posgrado de contaduría	570	-94	Con edificios en línea de vista
10	Facultad de Medicina	592	-107	Sótano del edificio
10	Facultad de Medicina	592	-86	Delante del edificio
11	Consejos académicos	626	-84	No hay ningún obstáculo relevante
12	Posgrado de odontología	730	-95	Tres edificios en línea de vista
13	Biblioteca central	831	-87	Delante del edificio
13	Biblioteca central	831	-101	Detrás del edificio
14	Colonia Ajusco	2730	-102	Larga distancia

En la Tabla 1 se observa que, en distancias cortas, a pesar de tener línea de vista directa el nivel de RSSI pasa los -80 dBm, aunque se mantiene bastante estable en las distancias más alejadas y con mayores obstáculos, no sobrepasando los valores aceptables en los que trabaja LoRa que serían entre -50 dBm y -140 dBm.

Con respecto a la Tabla 2 se observa una mayor diferencia en distancias cercanas, incluyendo interiores de edificaciones (como sótanos). En particular, el RSSI obtenido con la antena VERT 900 puede llegar hasta los - 72 dBm en el punto 1, esto es 8 dBm mayor con respecto a las mediciones de la otra antena. Por otro lado, en distancias más lejanas con pocos obstáculos como la primera medición del punto 13 se observa una diferencia de 10 dBm con respecto a ambas antenas, siendo mejor la VERT900, la cual se comporta mejor de forma general, recordando que la antena VERT900 tiene 2 dBi más de ganancia con respecto a la antena Glue Rod.

En el estudio se realizaron un total de 3200 mediciones y los paquetes enviados tenían un tamaño de dos bytes de información; sin embargo, no todos los paquetes fueron recibidos. Se obtuvieron resultados ligeramente mejores con la antena VERT900 debido a su mejor ganancia.

Una forma efectiva de verificar la recepción de los paquetes es considerando la tasa de error de paquetes (PER, por sus siglas en inglés). Si un paquete no es recibido, se puede inferir que se han superado los valores típicos de demodulación en LoRa, ya sea que el nivel de señal RSSI superó los -140 dBm aproximadamente o el nivel de señal con respecto al ruido es muy pequeño, por lo que ya no se podría diferenciar información de ruido (Lima et al., 2024; Morales-Alvarez et al., 2023; Andrade et al., 2021). Es importante destacar que, a medida que aumenta la distancia o se presentan obstáculos significativos (tales como un edificio justo delante del nodo, o si el punto donde se encuentra el nodo LoRa está en un sótano), es claro que aumentará la cantidad de paquetes no recibidos. Para calcular tasa de error de paquetes (PER), se realiza de forma sencilla con la siguiente ecuación.

$$PER[\%] = \frac{(paquetes\ enviados) - (pauqetes\ recibidos)}{(100)} \qquad (1)$$

La Tabla 3 presenta los valores correspondientes a la tasa de error de paquetes obtenidas con la Ecuación (1), en donde se observa que no hay una relación directa entre el RSSI y la tasa de error de paquetes. Por ejemplo, los puntos 2 y 9 tienen un RSSI promedio similar (-97 dBm y -94 dBm, respectivamente); sin embargo, el número de paquetes perdidos son 24 y 3 paquetes, respectivamente. Lo anterior indica que el PER no depende únicamente de la potencia de la señal recibida, sino también de la relación señal-ruido en el momento de la transmisión y la sensibilidad del receptor. Esto explica por qué, a pesar de que, aunque el punto 2 esté a 429 metros más cerca del gateway, se registra una mayor pérdida de paquetes. Esto se debe a que este punto está ubicado en el sótano de un edificio, lo que incrementa el ruido y afecta la demodulación de la señal, resultando en un mayor PER.

Tabla 3. Obtención del PER y RSSI promedio de las mediciones realizadas con la antena VERT900.

Punto #	Nombre	Distancia m	PER %	RSSI	Descripción
1	Zona de comida anexo de ingeniería	89	2%	-72	Un edificio en la línea directa al gateway
2	Edificio 12 ingeniería.	141	24%	-97	Sotano del edificio
3	Torre de ingeniería zona boscosa	170	0%	-85	En línea de vista
4	Frontón cerrado	190	4%	-86	Detro del frontón
5	Cibarium	250	2%	-86	En línea de vista
6	IIMAS	293	1%	-81	Poca vegetación
7	Biblioteca Facultad de ciencias	465	1%	-84	Con edificios en la línea de vista
8	Trabajo social	485	2%	-91	En línea de vista
9	Posgrado de contaduría	570	3%	-94	Con edificios en línea de vista
10	Facultad de Medicina	592	62%	-107	Sotano del edificio
10	Facultad de Medicina	592	2%	-86	Delante del edificio
11	Consejos académicos	626	3%	-84	No hay ningún obstáculo relevante
12	Posgrado de odontología	730	12%	-95	Tres edificios en línea de vista
13	Biblioteca central	831	6%	-87	Delante del edificio
13	Biblioteca central	831	21%	-101	Detrás del edificio
14	Colonia Ajusco	2730	23%	-102	Larga distancia

Para realizar un estudio comparativo, se puede considerar como ejemplo el comportamiento de tres escenarios principales de propagación a distancias similares, entre 500 y 600 metros: una zona boscosa, una línea de vista despejada y una zona urbana con edificios en la línea de vista (puntos 8, 9 y 11 de la Tabla 3). Para comparar estos tres escenarios, se analiza primero su potencia de señal recibida. Para ello se toman tres escenarios en donde se envían 100 paquetes y se muestra su nivel de RSSI promedio en la recepción de los mismos.

En esta comparación, los tres escenarios presentan un PER muy parecido (se observa claramente en la Tabla 3), lo que significa que casi todos los paquetes fueron recibidos, solo perdiéndose de 2 a 3 de los 100 transmitidos. En la Figura 9, se puede observar la propagación en línea de vista del punto 7, sin obstáculos, y que muestra el mejor RSSI, alrededor de -84 dBm, exponiendo que claramente tener línea de vista es la mejor forma de comunicación a través de redes inalámbricas. Entre la zona de línea de vista directa y la urbana existe una diferencia de 7 dBm y 9 dBm en la zona boscosa y entre estas dos últimas, la diferencia varía entre 1 dBm y 4 dBm, con un RSSI en la zona urbana de aproximadamente -92 dBm y en la zona boscosa alrededor de -94.5 dBm.

5. DISCUSIÓN

Como resultados obtenidos se puede comentar primero sobre las mediciones de potencia de señal con los dos tipos de antena usadas y su relación con la distancia y obstáculos en el terreno. Se observó que a pesar de que la antena VERT900 tiene una ganancia de 5 dBi, superior a los 3dBi de la antena Glue Rod, todo dentro del radio de distancias abarcados en el estudio de cobertura, presenta un comportamiento similar a esta, a pesar de tomar puntos alejados en interiores a edificaciones, las dos antenas mantuvieron valores de RSSI dentro del rango aceptable de LoRaWAN (-50 dBm y -140 dBm).

En segunda parte, se puede comentar sobre la influencia del terreno en el nivel de señal recibida (RSSI), observando en el estudio de tres escenarios diferentes cada uno con una tasa de error de paquetes y distancia similares, el nivel de señal recibida se comporta mejor en la zona de línea de vista directa, llegando a obtenerse niveles de señal recibida de -84 dBm, luego se comporta mejor en la zona urbana llegando a -92 dBm en promedio, (cabe mencionar que el escenario de zona urbana escogido no posee edificios de gran altura como se podrían presentar en grandes ciudades) y por último, pero no muy diferente de la zona urbana, está la zona boscosa, donde se recibe -94.5 dBm en promedio, solamente 2.5 dBm de diferencia con la zona urbana, en comparación con los 8 dBm diferencia entre la zona de línea de vista directa y la zona urbana y los 10 dBm de diferencia entre la línea de vista y la zona boscosa.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que el sistema de transmisión LoRaWAN es viable para entornos mixtos, siempre que se optimicen los parámetros de transmisión considerando las características del terreno. En particular, se evidenció que:

Influencia ambiental predominante: Las áreas boscosas y la presencia de edificaciones tienen un impacto significativo en el rendimiento de la red. La disminución en el nivel de RSSI, de al menos 10dB en zonas boscosas frente a áreas de línea de vista directa, resalta la necesidad de adaptar la configuración de la red en entornos con obstáculos naturales y artificiales.

Con respecto a la comparación de antenas: ambas mostraron un comportamiento similar en el rango de distancias evaluado. Esto sugiere que, en escenarios prácticos y con la presencia de obstáculos, las diferencias en las ganancias de las antenas utilizadas pueden verse amortiguadas por la complejidad del entorno. Además, el estudio sugiere que, en entornos similares, para el desarrollo de aplicaciones IoT, es viable el uso de la antena Glue Rod incluida en el nodo cubecell utilizado.

En relación a la variabilidad de las mediciones del PER y RSSI en diferentes escenarios: El análisis en tres escenarios, destaca la relevancia de los obstáculos en la atenuación de la señal.

En resumen, la propagación de la señal LoRaWAN está muy influenciada por diversos factores, como la distancia, los obstáculos y el tipo de antena utilizado. Las mediciones realizadas en diferentes escenarios proporcionan información valiosa para optimizar el diseño de redes LoRaWAN, maximizando la cobertura y reduciendo las pérdidas de paquetes en entornos complejos. Además, la consideración de factores como el tipo de terreno y la disposición de los obstáculos es crucial para garantizar una cobertura adecuada y minimizar la tasa de error de paquetes en aplicaciones de IoT.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, UNAM a través del proyecto PAPIIT IG100724. Roberto Travieso y Luis J. Olvera agradecen a la SECIHTI por la beca de maestría otorgada.

REFERENCIAS

Acevedo, L. J. O. 2025. Despliegue de una Red IoT LoRa para Potenciar Ciudades Inteligentes y Áreas Rurales en un Entorno Universitario. Master, Universidad Autónoma Nacional de México.

Andrade, G. A., Ramos, B. & Del Rosario, E. 2021. Comparación de Modelos Empíricos de pérdida LPWAN por Propagación en el campus Prosperina de la ESPOL: Resultados derivados de un estudio empírico. Revista Tecnológica-ESPOL, 33, 12-24.

Chen, F., Huo, Y., Zhu, J. & Fan, D. A review on the study on MQTT security challenge. 2020 IEEE International Conference on Smart Cloud (SmartCloud), 2020. IEEE, 128- 133.

Electronic Design. (2023a). LoRaWAN brings the IoT across longer distances: Part 1 Technology.

Electronic Design. (2023b). LoRaWAN brings the IoT across longer distances: Part 2 Technology.

Gopinath, J., Christober, A. E., Ravindrananth, K. Malath, K. LoRa WAN Communication using Wireless Sensor Network. 2022 International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA), 2022. IEEE, 406-412.

Heltec Automation. (s.f.-a). CubeCell – AB01 Dev-Board (V2). https://heltec.org/project/htcc-ab01-v2

Heltec Automation. (s.f.-b). HT-M02 Edge LoRa Gateway (V2). https://heltec.org/project/ht-m02-v2

Heltec Automation. (s.f.-c). Glue-rod-antennaipex-1. https://heltec.org/project/glue-rod-antennaipex-1

Lima, W. G., LOPES, A. V., CARDOSO, C. M., ARAÚJO, J. P., NETO, M. C., TOSTES, M. E., NASCIMENTO, A. A., RODRIGUEZ, M. & BARROS, F. J. 2024. LoRa Technology Propagation Models for IoT Network Planning in the Amazon Regions. Sensors, 24, 1621.

Morales-Álvarez, J. P., Cruz-Sánchez, E. Hirales-Valles, D.A., Rodríguez-Abdalá V. I. García- Verdugo, J.N. and Vazquez Morales., G. E.2023. Sistema de monitoreo LoRaWAN de consumo de agua. PÃ¤di BoletÃ-n CientÃ-fico de Ciencias BÃ¡sicas e IngenierÃ-as del ICBI, 11, 183-189.

Zhu, Q., Wang, R., Chen, Q., Liu, Y. & Qin, W. IoT gateway: Bridging wireless sensor networks into internet of things. 2010 IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing, 2010. IEEE, 347-352.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Measuring Energy, Water Consumption, and Carbon Footprint for each Query Generated by ChatGPT

Valtiérrez Angel, David Arnoldo *, Vázquez Tiscareño, Raúl *, González Hernández, Jorge Luis*, Acosta Armendáriz, Cesar Adán *, Nevárez Fierro, Cesar Jesús *, Fierro Villarreal, Victorina**

** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Delicias, Paseo Tecnológico Km 3.5 Cd. Delicias, Chihuahua, México. C.P. 33000. (Tel: (667) 888-5000; e-mail: david.va@delicias.tecnm.mx; raul.vt@delicias.tecnm.mx; jorge.gh@delicias.tecnm.mx; cesar.aa@delicias.tecnm.mx; cesar.nf@delicias.tecnm.mx)*

*** Centro de Estudios Tecnológicos Ind. y de Serv. #87. Av. Tecnológico s/n, Centro. Cd. Delicias, Chihuahua, México. C.P. 33100. (Tel: (639) 474 4958; e-mail: vickyfierro04@gmail.com)*

Abstract: This research study addresses the existing problem of high electricity and water consumption, as well as the carbon footprint produced and derived from the use of intelligent applications such as ChatGPT in the field of Generative Artificial Intelligence, causing a significant environmental impact and the present and future consequences that this situation represents for human well-being in the ecological and social spheres. The research suggests that, while these technologies offer benefits in productivity and access to information, their rapid growth demands large amounts of energy, producing ecological consequences that urgently need to be addressed. The cumulative impact of their environmental footprint on human well-being is considered, highlighting the need to establish ethical and sustainable criteria for their development and use. Therefore, it is necessary to promote critical awareness of the current smart consumption model. This study uses a quantitative approach, employing a non-experimental, cross-sectional, and descriptive design, and proposes a software prototype through a mobile application called VerifyTecCO2, in addition to the use of existing tools, which allow visualization of statistics to analyze the environmental impact generated using models such as ChatGPT. A statistical formula for finite samples was applied to 330 users, from a universal population of 2,345 students with a confidence level of 95% and a sampling error of 5%, from the Instituto Tecnológico de Delicias.
Keywords: Generative Artificial Intelligence, ChatGPT, Electricity consumption, Water consumption, Carbon footprint, Energy, Environmental impact.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, en el ámbito de la inteligencia artificial generativa, herramientas inteligentes como ChatGPT han revolucionado extraordinariamente la forma en que se interactúa con la tecnología, ofreciendo respuestas instantáneas a las múltiples peticiones por parte de los usuarios y una asistencia de carácter personalizado. Sin embargo, esta innovación tecnológica, implica un alto coste energético e hídrico causando un impacto y deterioro ambiental significativo, producto de la huella de carbono resultante, que implica su excesiva utilización. Este estudio se lleva a cabo con estudiantes, usuarios de ChatGPT del Instituto Tecnológico de Delicias (En lo sucesivo ITD).

Según De Vries (2023), especialista en sostenibilidad digital, "una sola consulta a ChatGPT puede consumir hasta 3 Wh de energía, lo que representa diez veces el consumo de una búsqueda en Google, que consume 0.3 Wh de electricidad". Este dato ha sido respaldado por estudios de la organización Epoch AI, que estiman que el modelo GPT-4o consume aproximadamente 0.3 Wh por interacción, gracias a mejoras en eficiencia energética. Afirma un estudio reciente por The Washington Post (2024) citado por Wright (2025) de la Business Energy UK, "la electricidad utilizada para generar un correo electrónico de 100 palabras equivale a alimentar 14 bombillas LED durante una hora (0,14 kilovatios-hora: kWh)". Ahora bien, de acuerdo con datos proporcionado por Rob Friedlander, portavoz de la compañía OpenIA y citado por González (2025), "El chatbot de OpenAI recibe más de 2,500 millones de solicitudes diarias, lo que equivale a cerca de 912,500 millones de consultas anuales". A pesar de los avances tecnológicos para optimizar recursos de diferente índole, el entrenamiento de modelos como "GPT-3 con 175 mil millones de parámetros emitió aproximadamente 552 toneladas CO2 equivalente (CO2eq), lo que equivale al triple de las emisiones de un avión de reacción en un viaje de ida y vuelta entre San Francisco y Nueva York". (Zhaojian, Yinghao, Zhuotao, Yansong y Xiao-Ping, 2024).

El consumo hídrico también es alarmante, "usar el modelo ChatGPT-4 de OpenAI para generar un correo electrónico de 100 palabras consume más líquido que una botella de agua de Evian de 519 mililitros" (The Washington Post, 2024 citado por Wright, 2025), utilizada principalmente en sistemas de refrigeración de centros de datos. Aunque Sam Altman, CEO de OpenAI, afirma que "cada consulta consume apenas

0.00032 litros de agua. Esas cifras mencionadas por él tienen un problema: no tienen ningún respaldo visible. Las arroja sin citar fuentes o explicar de dónde se las ha sacado, algo que hace difícil creerle" (Pastor, 2025).

En síntesis, el presente proyecto proporciona un prototipo de aplicación móvil denominado **VerifyTecCO2**, aún en fase de desarrollo, pero funcional, que muestra en tiempo real a los usuarios de ChatGPT, estadísticas y datos crudos mediante la implementación de una API, generada cada vez que se hace una consulta particular formal o informal. Con cifras reales y validadas se busca analizar de manera crítica el impacto ambiental de ChatGPT, considerando su huella energética, hídrica y de carbono que incide directamente en el ecosistema e inclusive en el creciente y alarmante calentamiento global. Todo ello con el objetivo de fomentar un uso más consciente, ético y sostenible de la inteligencia artificial.

1.1 Planteamiento del Problema

¿Cómo afecta el uso cotidiano de modelos de inteligencia artificial como ChatGPT al medio ambiente en términos de consumo energético, hídrico y huella de carbono, y qué medidas pueden adoptarse para mitigar este tipo de impactos en un contexto de creciente dependencia tecnológica?

1.2 Objetivo General

Desarrollar una App móvil que permita mostrar estadísticos para analizar el impacto ambiental generado por el uso de modelos como ChatGPT, enfocado en el consumo energético, hídrico y la huella de carbono, con el fin de identificar estrategias de mitigación que promuevan un uso más sostenible de esta tecnología.

1.3 Hipótesis

La aplicación del software desarrollado VerifyTecCO2, permite estimar de manera precisa y confiable el consumo energético, hídrico y la huella de carbono generada por el uso individual de ChatGPT.

2. ANTECEDENTES.

El desarrollo y uso de modelos de inteligencia artificial generativa como ChatGPT ha generado un profundo impacto en diversos sectores, desde la educación en todos los niveles académicos, hasta la industria. Sin embargo, su creciente adopción ha provocado una serie de preocupaciones sobre su sostenibilidad ambiental, especialmente en términos de consumo energético, hídrico y emisiones de carbono. A continuación, se analizan los referentes del impacto ambiental.

2.1 Consumo Energético:

Modelos como ChatGPT requieren una infraestructura computacional intensiva. De Vries (2023) estimó que "OpenAI requería 3,617 servidores HGXA100 de NVIDIA, con 28,936 unidades de procesamiento gráfico (GPU), para soportar ChatGPT, implicando una demanda energética de 564 MWh diarios. En comparación con los 1,287 MWh estimados utilizados en fase de entrenamiento de GPT-3". Como nota aclaratoria en el presente estudio, "*Esta es una traducción no oficial de un artículo que apareció en una publicación de Elsevier…*". No obstante, estudios más recientes de Epoch AI (2025), establecen que, "OpenAI utiliza GPUs Nvidia H100 para la inferencia de ChatGPT. Con una potencia nominal de 700 vatios, consumiendo aproximadamente 1500 W por GPU, generando hasta 989 billones de FLOP por segundo y tardando 0.1 segundos en procesar una consulta". En concreto, "el coste computacional de entrenar los modelos de IA más avanzados se ha duplicado aproximadamente cada 3.4 meses desde 2012" (PICTET, 2025). En cuanto al número de parámetros, según Chudleigh (2025), "GPT-3 tiene 175 mil millones de parámetros, mientras que GPT-4 tiene 1,8 billones de parámetros. GPT-4 consiste en 8 modelos, cada uno compuesto por 220 mil millones de parámetros".

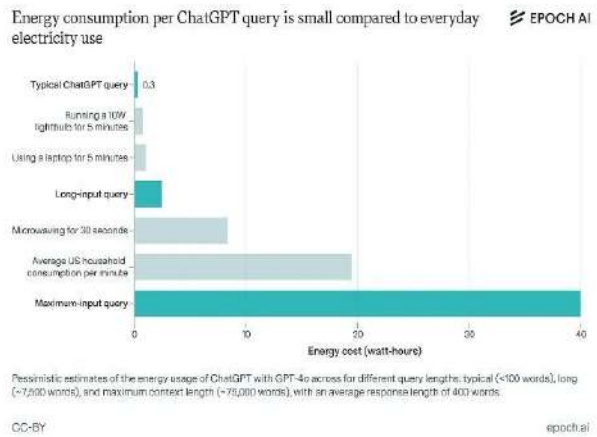


Fig. 1. Consumo de energía eléctrica por consulta de ChatGPT. Fuente: EPOCH AI (2025).

2.2 Consumo Hídrico:

Estudios revelan que "Chat-GPT3 utiliza alrededor de 500 mililitros de agua entre 10 y 50 preguntas que responde, equivalente a dos vasos. Esta IA, usaría diariamente entre 800.000 y 4 millones de vasos, es decir, el consumo entre 100 y 500 mil personas". (Docarmo, 2025). Esto sin considerar que, "no parece incluir aquí el coste energético y de agua, con miles de GPUS, funcionando a toda potencia durante meses, disipando cantidades elevadas de calor" (Pastor, 2025). "Como señalaba el investigador Ethan Mollick, GPT-4 probablemente usó más de 50 GW [sic] para ser entrenado, suficiente para dar energía a 5.500 hogares en un año" (Pastor, 2025). Aclarando el dato, se debe utilizar GWh (energía).

De hecho, "el consumo energético masivo de servidores de IA genera mucho calor. Para disiparlo al exterior y evitar el sobrecalentamiento de servidores, los centros de datos utilizan torres de refrigeración o aire exterior, que requieren una cantidad considerable de agua limpia" (Ren, 2023). Tan solo "generar una imagen con IA requiere 2 a 5 litros de agua, debido al procesamiento de gráficos, es decir, 1 o 2 botellas de agua y crear múltiples imágenes utiliza 20 a 50 litros, equivalente a una ducha rápida" (El Financiero, 2025). En este punto, es de suma importancia resaltar que, "70% del planeta está cubierto de agua, 97.5% es agua salada y 2.5%, agua dulce. Menos del 1% está disponible para consumo humano y ecosistemas, 2,000 millones de personas carecen de agua potable segura y 771 millones no la tienen" INSP (2025).

Fig. 2. Consumo operativo de agua de un centro de datos.
Fuente: arXiv:2304.03271 (2025).

2.3 Huella de Carbono:

En primer lugar, identificamos el concepto y su impacto en el ecosistema natural y naturaleza humana. A saber, "el dióxido de carbono (CO2), compuesto molecularmente de oxígeno y carbono, es un gas que naturalmente se encuentra en diversas superficies de la Tierra, como la atmósfera y tiene la finalidad de atrapar la radiación infrarroja para devolverla al espacio" (Guerra Jáuregui, 2024). Este es un proceso normal, siempre y cuando no exceda las proporciones recomendadas, ya que de otra forma contribuye al calentamiento global de la tierra.

En cuanto a este factor, especialistas definen que, los niveles adecuados de CO2 en la atmósfera para mantener el equilibrio ecológico se deben situar entre los 330 y 350 ppm, no obstante, según estudios realizados por la NASA (2025), "la cantidad de CO2 aumentó de 365 partes por millón (ppm) en 2002 a 430 ppm en la actualidad. (Partes por millón: *se refiere a la cantidad de moléculas de dióxido de carbono por millón de moléculas de aire seco*)", contribuyendo significativamente con el derretimiento de los glaciares y, en consecuencia, con el aumento significativo en los niveles del mar, así como cambios drásticos en el clima que dan origen a fenómenos como sequias prolongadas, altas temperaturas térmicas, etc. Para ejemplificar lo anterior, según Guerra Jáuregui (2024), los "modelos de lenguaje grande (LLM) y multimodales (LMM), como la creación de ChatGPT con sus procesos de entrenamiento e inferencia y mantenimiento, produjeron 8.4 toneladas de CO2 anuales". En la figura 3 se muestra como "la industria de la producción de electricidad y calor ha propiciado un aumento significativo del 46 % en las emisiones globales. Con más de 14 billones de toneladas de gases de efecto invernadero" (Guerra Jáuregui, 2024).

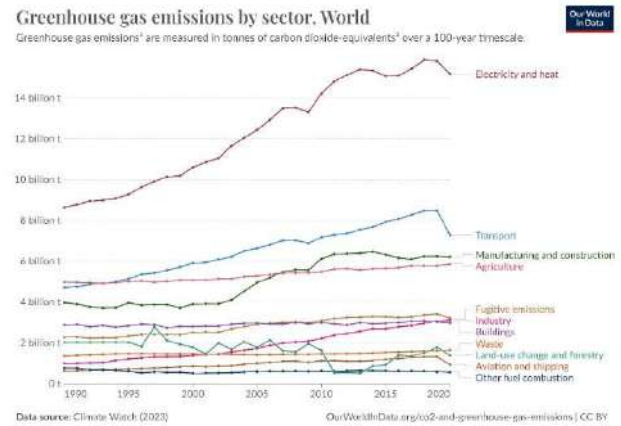


Fig. 3. Emisiones de GEI por sector a nivel mundial.
Fuente: Our World in Data (2023).

Según Zhaojian et al, 2024, "el carbono incorporado, que representa las emisiones asociadas con la fabricación de hardware y los procesos involucrados en la producción de un producto determinado, se calcula de la siguiente manera:"

$$C' = \sum_{r=0}^{n} \frac{T}{T'_r} \cdot C_r \qquad (1)$$

Donde: "C′ y T indican el carbono incorporado y tiempo de entrenamiento del modelo a estimar. Cr y T′r, representan el carbono del producto y vida útil de la GPU r-ésima, respectivamente. "n", hardware involucrado en el proceso de entrenamiento" (Zhaojian et al, 2024). Esta situación, cita este mismo autor, puede plantear un verdadero dilema ético sobre las consecuencias de su implementación puesto que "las graves implicaciones ecológicas de los modelos a gran escala exigen que los proveedores y usuarios de servicios de IA sean conscientes de la huella de carbono de los diversos modelos emergentes a gran escala".

3. MARCO TEÓRICO

El desarrollo y la expansión de los modelos de inteligencia artificial generativa, como ChatGPT, entre otros, han dado origen a un creciente interés respecto a sus impactos ambientales. Estos sistemas requieren una cantidad significativa de recursos energéticos e hídricos durante su entrenamiento y uso cotidiano, lo que plantea desafíos en materia de sostenibilidad e impacto en la huella de Carbono.

Diversos estudios han puesto de manifiesto la dificultad para establecer cifras precisas sobre el consumo energético y las emisiones de carbono asociadas a la inteligencia artificial. Por ejemplo, según Hollingworth, (2025), "la huella de carbono de una sola consulta de IA puede variar según el tamaño del modelo, el hardware y la eficiencia del centro de datos, pudiendo generar emisiones de CO2 entre 0.02 y 0.05 gramos por consulta corta". De esta manera, "individualmente, una consulta de ChatGPT tiene una huella pequeña, pero a gran escala, se acumula. Si se ejecutan mil millones de consultas al mes, a 0.05 gr. por consulta, esto equivale a unas 50 toneladas métricas de CO2 mensuales". (Hollingworth, 2025). Aunque es importante aclarar que la ausencia de criterios uniformes para definir una 'consulta promedio' suele dificultar la comparación entre las diferentes plataformas y tecnologías existentes hoy en día, ya que tan solo por ejemplificar una situación para los modelos de lenguaje grandes (LLM) de código abierto, un estudio publicado el 18 de junio en Frontiers in Communication denominado 'Energy costs of communicating with AI' de Dauner y Socher (2025) y citados por Zhao (2025), establecen que, "se examinó 14 de estos modelos , incluidos los de Meta y DeepSeek, y se descubrió que algunos modelos producían hasta 70 veces más emisiones de CO2 que otros".

Por otra parte, el impacto ambiental no se limita al consumo energético. La revisión exhaustiva en la literatura reciente destaca el uso intensivo de agua en los centros de datos, tanto en refrigeración de equipos como para la fabricación de chips de alto rendimiento, el procesamiento de grandes volúmenes de datos y las consultas realizadas sobre los mismos. En este sentido, estudios estiman que "ejecutar la inferencia de GPT-3 para 10-50 consultas consume 500 mililitros de agua,

dependiendo de cuándo y dónde se aloje el modelo. GPT-4, el modelo actual, tiene un tamaño mucho mayor y, por ende, consume más agua que GPT-3" (Ren, 2023).
De hecho, estudios recientes, según Meza Capcha (2025), demuestran que la generación de imágenes generadas por inteligencia artificial "al estilo Studio Ghibli, produjo una preocupación ambiental inesperada: el consumo masivo de agua, pues en menos de una semana se utilizaron 216 millones de litros para generar este tipo de contenidos. Equivalente al consumo mensual de una ciudad pequeña". En palabras de esta misma autora: ¿vale la pena consumir millones de litros de agua para generar imágenes digitales de alta calidad? Para algunos, la creatividad y el entretenimiento digital justifican este gasto. Para otros, se trata de un lujo insostenible". Más aún, se espera que, "a escala global, el crecimiento proyectado de esta industria podría requerir entre 4200 y 6600 millones de metros cúbicos de agua para 2027, una cantidad similar al consumo anual de Dinamarca o la mitad del Reino Unido" (Meza Capcha, 2025). En el plano energético, el crecimiento proyectado es aún más alarmante. De acuerdo con estimaciones recientes, "los centros de datos crecerán un 160% para 2030, que representará entre 3% y 4% del consumo eléctrico mundial. De paso, las emisiones de dióxido de carbono de centros de datos podrían duplicarse con creces entre 2022 y 2030" (Goldman Sachs, 2024).
En conjunto, estos referentes bibliográficos evidencian la necesidad de establecer métricas estandarizadas, transparentes y verificables que permitan evaluar de manera rigurosa la huella ambiental de la inteligencia artificial generativa y concretamente en el uso excesivo de ChatGPT.

4. METODOLOGÍA

Se adopta un Enfoque Cuantitativo pues de acuerdo con Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio (2010), este enfoque, "usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base a la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías". Basado en un prototipo tecnológico-aplicado, orientado al desarrollo de una solución informática inteligente para dispositivos móviles denominada **VerifyTecCO2**, para analizar el impacto ambiental generado por el uso de modelos de inteligencia artificial como ChatGPT.

4.1 La metodología se estructura en tres fases principales.

a) Recolección y sistematización de datos ambientales: Mediante la integración de fuentes secundarias confiables: reportes técnicos, estudios científicos y APIs especializadas.

b) Validación funcional y evaluación de impacto:
Se aplicaron instrumentos de medición como un cuestionario autoadministrado, análisis de estadísticos descriptivos, interpretación y evaluación de los datos utilizando Pasw18.

c) Desarrollo e implementación de la aplicación móvil:
Se utilizó Android Studio, plataformas como **Flutter** y lenguaje de programación **Dart**, gestores de Base de Datos como **SQLite** y técnicas de visualización estadística.

Fig. 4. Pantallas de la App Móvil **VerifyTecCO2,** que muestran el impacto del gasto energético y huella de carbono producto de ChatGPT. Fuente: (Elaboración propia, 2025).

4.2 Diseño de Investigación

Se emplea un diseño no experimental, transversal y descriptivo, ya que, "su propósito es describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado" (Hernández Sampieri, 2010, p. 151). El estudio se centra en la recopilación de datos sobre el uso de ChatGPT por parte de usuarios del sector estudiantil a nivel superior y su relación con indicadores ambientales.

4.3 Población, Muestra y Plan de procesamiento y análisis de información.

La población está compuesta por **2,345** estudiantes activos de ChatGPT. Seleccionando una muestra aleatoria simple.
El procesamiento de datos se llevará a cabo mediante un ejercicio estadístico con el fin de "obtener distribuciones de frecuencia y efectuar diversos cálculos estadísticos…", (Arias Galicia, 2007, p. 204), de tal forma que se puedan sustentar los resultados obtenidos en esta investigación. En este análisis estadístico se utilizó PASW 18. De tal manera que, para hacer una extrapolación de la muestra Universal, y determinar a "n" muestral, se utilizará la siguiente formula estadística:

$$\mathrm{n} = \frac{k^2 * p * q * N}{(e^2 * (\mathrm{N}-1)) + k^2 * \mathrm{p} * \mathrm{q}} \qquad (2)$$

Donde:
N= Población universal.
n= Tamaño de la muestra a evaluar.
K= Nivel de Confianza. (1.96, del 95% de confianza).
p y q= Proporción de individuos que poseen o no una característica en este estudio con un 50% (0.5), cada uno.
e: error muestral deseado. (En este estudio se utiliza el 5%).
Sustituyendo:

$$\boldsymbol{n} = \frac{1.96^2 * 0.5 * 0.5 * 2345}{(0.05^2 * (2345-1)) + 1.96^2 * 0.5 * 0.5}$$

n = 330

El propósito en esta investigación, es determinar datos estadísticos, como la moda para medir tendencias, media y varianza, ya que de acuerdo con Bernal Torres (2006), "la moda es la categoría o puntuación que ocurre con mayor frecuencia en un registro de datos", empleando estadígrafos, pues según Hernández Sampieri, et al (2010, p. 305), "los datos casi siempre se recolectan de una muestra y sus resultados estadísticos se denominan estadígrafos; ejemplo de ello son la media o la desviación estándar de la distribución de una muestra". Por lo tanto, en este estudio, se aplicó un instrumento de recolección de datos para **330 estudiantes** de diversas especialidades en el ITD que utilizan ChatGPT.

5. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

En este estudio se aplicó el prototipo de la App móvil **VerifyTecCO2**, el cual ya ***es funcional, pero aún sigue en fase de desarrollo***. También se aplicaron herramientas para identificar la huella de carbono emitida por la inteligencia Artificial generativa, destacando los autores Lacoste, Luccioni, Schmidt y Dandres (2019), quienes "propusieron una herramienta para cuantificar el CO2 generado por modelos de aprendizaje automático, considerando variables como tipo de hardware, ubicación geográfica y la duración del entrenamiento". En la misma línea, se analizó la herramienta de la EPA (2025), de la U.S. Environmental Protection Agency, presentando una calculadora para "medir equivalencias de gases de efecto invernadero. Convirtiendo los datos de emisiones o energía en datos entendibles, como las emisiones anuales de CO2".

En cuanto al análisis de Estadísticos Descriptivos por Frecuencias, se muestra un extracto de los gráficos más representativos, con los resultados obtenidos en el cuestionario aplicado a **330 estudiantes** y cuyas figuras son de elaboración propia. Estudio basado en un **IC95%** y error muestral del 5%.

Destaca en la **figura 5** que un **37.58%** de los encuestados, es decir, 124 estudiantes, utilizan diariamente ChatGPT, en tanto que el 41.21% con 136 estudiantes lo utilizan semanalmente.

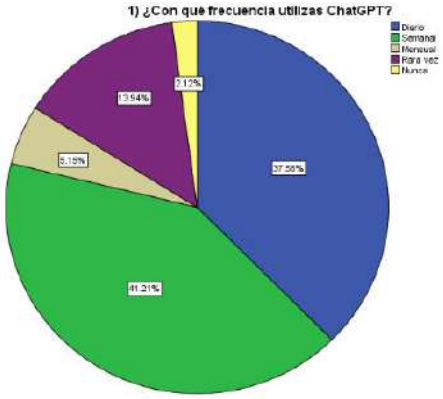


Fig. 5. Estadísticos sobre Frecuencia de uso de ChatGPT.

En la **figura 6**, se observa que 215 estudiantes que corresponden a un **65.2%** le dedica una hora diaria utilizándolo, lo que genera un gasto considerable de recursos energéticos.

Fig. 6. Horas dedicadas al día utilizando ChatGPT.

En la **figura 7**, se detalla que 209 estudiantes, es decir el **63%** de los 330 encuestados, usa ChatGPT en la realización de sus tareas escolares. Un dato importante si se considera que los estudiantes se están volviendo cada vez más dependientes de las tecnologías inteligentes para sus actividades académicas, con el riesgo de disminuir la aplicación de su análisis cognitivo.

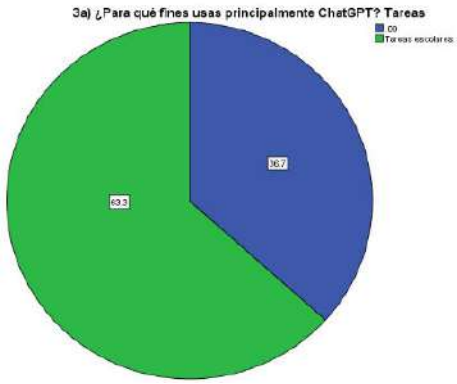


Fig. 7. Actividad principal realizada en ChatGPT.

Mientras que en la **figura 8**, es alarmante que solo a 74 estudiantes, es decir, un **22.49%** le preocupe realmente el impacto ambiental que tiene usar tecnologías inteligentes como ChatGPT.

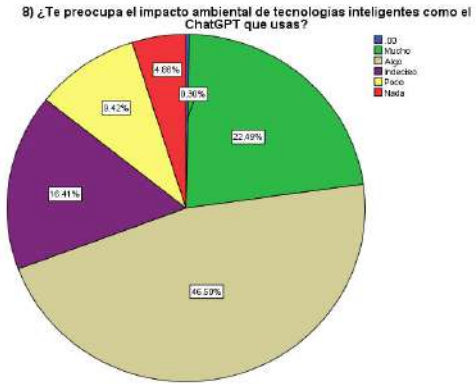


Fig. 8. Preocupación sobre el impacto ambiental de ChatGPT.

En la **figura 9**, resalta el hecho de que el **80%** de los encuestados que corresponde a 264 estudiantes, si están dispuestos a utilizar una nueva herramienta como VerifyTecCo2, para medir el impacto ambiental que produce el uso continuo de ChatGPT, por lo que se perfila como viable para su implementación a nivel usuario.

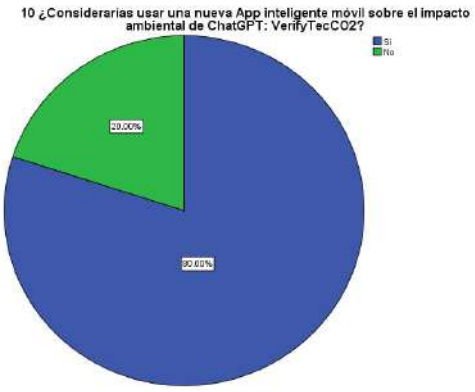


Fig. 9. Utilización de nueva App móvil VerifyTecCO2.

Finalmente, en la **tabla 1** se muestran los resultados del análisis estadístico en donde se determinó la media, la moda y la varianza.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos desarrollados en PASW 18.

		1) ¿Con qué frecuencia utilizas ChatGPT?	2) ¿Cuántas horas le dedicas al día utilizándolo?	3a) ¿Para qué fines usas principalmente ChatGPT? Tareas	4) ¿Sabías ChatGPT impacta ambientalmente, pues cada consulta consume grandes cantidades de energía eléctrica?	5) ¿Sabías que usar ChatGPT, consume grandes cantidades de agua en servidores y centros de datos?
N	Válidos	330	330	330	330	330
	Perdidos	0	0	0	0	0
Media		2.0182	2.1515	.6333	1.2818	1.3273
Moda		2.00 (Semanal)	2.00 (1 hora)	1.00 (Tareas)	1.00 (Sí)	1.00 (Sí)
Varianza		1.179	.792	.233	.203	.227

		6) ¿Sabía que IA contribuye a la emisión de gases CO2, de efecto invernadero?	7) ¿Has intentado reducir el uso de herramientas inteligentes por razones ambientales?	8) ¿Te preocupa el impacto ambiental de tecnologías inteligentes como el ChatGPT que usas?	9a) ¿Qué características te son útiles en una app móvil para medir el impacto ambiental y huella de Carbono? Eléctrico	10 ¿Considerarías usar una nueva App inteligente móvil sobre el impacto ambiental de ChatGPT: VerifyTecCO2?
N	Válidos	330	330	329	330	330
	Perdidos	0	0	1	0	0
Media		1.6152	1.6000	2.2675	.5394	1.2000
Moda		2.00 (Sí)	2.00 (No)	2.00 (No)	1.00 (Hábitos sostenibles)	1.00 (Sí)
Varianza		.244	.253	1.148	.261	.160

Cabe destacar que, estos hallazgos son válidos únicamente para el contexto local de la muestra estudiantil del ITD y que, por lo tanto, se requiere ampliar el estudio a poblaciones más diversas para obtener conclusiones globales.

6. CONCLUSIONES

La implementación de **VerifyTecCO2**, logró el **objetivo** de obtener mediciones y su utilidad, ya que la **hipótesis** aquí planteada recibió evidencia a favor puesto que la aplicación del software VerifyTecCO2, si permite estimar de manera precisa y confiable el consumo energético, hídrico y la huella de carbono generada por el uso individual de ChatGPT.

Adicionalmente, se hizo un diagnóstico inicial situacional sobre el problema del impacto ambiental por el uso de aplicaciones de IA., como ChatGPT. En concordancia "investigadores establecieron que el consumo diario de agua de ChatGPT es de 74.14 millones de litros (19.58 millones de galones), y el consumo diario de electricidad es de 19.99 millones de kWh" (Economist, 2025).

Si bien el uso de la Inteligencia Artificial aporta grandes beneficios en pro de la comunidad internacional, lo cierto es que "La revolución de la IA requiere una inmensa cantidad de energía. Para ponerlo en perspectiva, se espera que para 2030 los centros de datos, que son clave para la IA, consuman una cuarta parte de la energía de Estados Unidos" (PICTET, 2025). De hecho, para el procesamiento de datos y generación de tokens a las consultas de usuarios se requieren áreas específicas como "un centro de datos, un edificio con temperatura controlada que alberga infraestructura informática, como servidores, unidades de almacenamiento de datos y equipos de red esperando que para 2026, el consumo de electricidad de estos se acerque a los 1.050 teravatios-hora" (Zewe, 2025). Por lo tanto, "el aumento previsto de las emisiones de dióxido de carbono de los centros de datos representará un coste social de entre 125,000 y 140,000 millones de dólares (al valor actual), según analistas" (Goldman Sachs, 2024). Por otra parte, estudios realizados por la ONU (2024), definen que, "los centros de datos consumen grandes cantidades de electricidad, produciendo emisiones de gases de efecto invernadero. Requieren grandes cantidades de agua para enfriar componentes eléctricos. La demanda mundial de IA consumirá 4,200 a 6,600 millones de metros cúbicos para 2027". Es importante enfatizar que la situación actual se puede tornar más crítica ya que según un experto de PICTET (2025), destaca que este elevado consumo no se veía desde hace décadas y recuerda que "Elon Musk declaró recientemente que, en el mundo, la próxima escasez será de energía, no de agua". Finalmente, un aspecto crítico identificado en la literatura es la falta de transparencia de las empresas desarrolladoras de IA. OpenAI, entre otras, no publica datos verificables sobre el uso energético o hídrico de sus modelos, lo que limita la posibilidad de evaluar su sostenibilidad de manera independiente. De hecho, "se descubrió que el 84% del uso de LLM en mayo de 2025 correspondía a modelos sin ninguna información medioambiental. Esto significa que los consumidores eligen de forma abrumadora modelos cuyo impacto ambiental desconocen por completo" (Wired, 2025). Se recomienda como posible línea de investigación futura, medir las emisiones de CO2 y el impacto ambiental que producen los diferentes agentes inteligentes como: Grok AI, Google Géminis, LLaMA (Meta IA), Claude AI, IA de perplejidad (Perplexity AI) y Copilot.

REFERENCIAS

Arias Galicia, L. (2007). Metodología de la Investigación. 7ª. Edición. México: Editorial Trillas.

Bernal Torres, C. (2006). Metodología de la Investigación. 2ª. Edición. México: Editorial Pearson / Prentice Hall.

Chudleigh, S. (2025). GPT-3 vs GPT-4 | ¿Cuál es la diferencia? Consultado en: https://www.botpress.com/es/blog/gpt-3-vs-gpt-4-whats-the-difference

Dauner, M. y Socher, G. (2025). Energy costs of communicating with AI. Consultado en: https://www.frontiersin.org/journals/communication/articles/10.3389/fcomm.2025.1572947/full

De Vries, A. (2023). The growing energy footprint of artificial intelligence, Joule,Volume 7, Issue 10, Pages 2191-2194, ISSN 2542-4351. Consultado en:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435123003653?dgcid=author

Docarmo, X. (2025) Un vaso de agua, el precio de ChatGPT. Consultado en: https://dialogopolitico.org/debates/agua-inteligencia-artificial

Economist (2025). El consumo anual de energía de ChatGPT equivale al de 112 países. Consultado en: https://economis.com.ar/el-consumo-anual-de-energia-de-chatgpt-equivale-al-de-112-paises/

El Financiero (2025). El costo oculto de la IA: ¿Cuánta agua gasta ChatGPT al crear imágenes? Consultado en: https://www.elfinanciero.com.mx/monterrey/2025/03/31/el-costo-oculto-de-la-ia-cuanta-agua-gasta-chatgpt-al-crear-imagenes/

EPA (2025). Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. Consultado en: https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator

EPOCH AI (2025), "How much energy does ChatGPT use?". Published online at epoch.ai. Consultado en: https://epoch.ai/gradient-updates/how-much-energy-does-chatgpt-use

Guerra Jáuregui, M. (2024). El costo ambiental de la IA. Consultado en: https://observatorio.tec.mx/el-costo-ambiental-de-la-ia/

Goldman Sachs (2024). AI is poised to drive 160% increase in data center power demand. Consultado en: https://www.goldmansachs.com/insights/articles/AI-poised-to-drive-160-increase-in-power-demand

González, F. (2025). ChatGPT recibe más de 2,500 millones de solicitudes al día; ¿se acabó el reinado de Google? Consultado en: https://es.wired.com/articulos/chatgpt-recibe-mas-de-2500-millones-de-solicitudes-al-dia-se-acabo-el-reinado-de-google

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, P. (2006). Metodología de la Investigación. 4ª. Edición. México: Editorial Mc Graw Hill.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, P. (2010). Metodología de la Investigación. 5ª. Edición. Chile: Editorial Mc Graw Hill.

Hollingworth, D. (2025). ChatGPT produces an estimated 4.32 grams of CO2 for every query. Consultado en: https://www.cyberdaily.au/security/11942-chatgpt-produces-an-estimated-4-32-grams-of-co-for-every-query

INSP (2025). Día Mundial del Agua 2025. Gobierno de México. Consultado en: https://insp.mx/avisos/22-de-marzo-dia-mundial-del-agua-2025

Lacoste, A., Luccioni, A., Schmidt, V. y Dandres, T. (2019). Quantifying the carbon emissions of machine learning. Consultado en: https://arxiv.org/pdf/1910.09700

Meza Capcha, E. (2025). ChatGPT habría gastado 216 millones litros de agua por las imágenes con inteligencia artificial. Consultado en: https://www.infobae.com/peru/2025/04/02/chatgpt-habria-gastado-216-millones-litros-de-agua-por-las-imagenes-con-inteligencia-artificial/

NASA (2025). Dióxido de carbono. Consultado en: https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/?intent=111

ONU (2024). ¿Cuánta energía utiliza la IA? Consultado en: https://unric.org/es/cuanta-energia-utiliza-la-ia/

Pastor, J. (2025). Sam Altman afirma que el consumo de agua y energía de ChatGPT es ínfimo. El problema es que no da pruebas de ello. Consultado en: https://www.xataka.com/robotica-e-ia/sam-altman-afirma-que-consumo-agua-energia-chatgpt-infimo-problema-que-no-da-pruebas-ello

PICTET (2025). ¿A qué se debe el elevado consumo energético de la IA? Consultado en: https://am.pictet.com/pictetparati/invertir-en-innovacion/2025/consumo-energetico-ia

Ren, S. (2023). How much water does AI consume? The public deserves to know. Consultado en: https://oecd.ai/en/wonk/how-much-water-does-ai-consume

Wired (2025). Nadie quiere informar cuánta energía usa la IA. Wired en español. Consultado en: https://es.wired.com/articulos/nadie-quiere-informar-cuanta-energia-usa-la-ia

Wright, I. (2025). Consumo de energía visualizado en ChatGPT. Consultado en: https://www.businessenergyuk.com/knowledge-hub/chatgpt-energy-consumption-visualized/

Zhao, C. (2025). How much energy does your AI prompt use? It depends. Consultado en: https://www.sciencenews.org/article/ai-energy-carbon-emissions-chatgpt

Zhaojian, Y., Yinghao, W., Zhuotao, D., Yansong, T., Xiao-Ping, Z. (2024). OpenCarbonEval: A Unifi ed Carbon Emission Estimation Framework in Large-Scale AI Models. Consultado en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://arxiv.org/pdf/2405.12843

Zewe, A. (2025). Explained: Generative AI's environmental impact. MIT News. Consultado en: https://news.mit.edu/2025/explained-generative-ai-environmental-impact-0117

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Literature Review: Detection and Estimation of Foliar Severity in Tomato (*Solanum lycopersicum*)

Astrid Ariadna Torres Fernández*[1,2], Yasmín Hernández [1], Javier Ortiz Hernández[1], Victor Santiago Santiago[2]

** TECNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo, Tecnológico (CENIDET), Cuernavaca, Morelos México (e-mail: d24ce113@cenidet.tecnm.mx*, yasmin.hp@cenidet.tecnm.mx, javier.oh@cenidet.tecnm.mx)*

TECNM/Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala, Tlax.90122 México (e-mail: victor.ss@altiplano.tecnm.mx)

Abstract: Tomato (*Solanum lycopersicum*) is one of the most important horticultural crops in Mexico, both for its economic relevance and its role in food security. However, it faces phytosanitary threats, among which vascular wilt caused by the fungus *Fusarium oxysporum* stands out due to its impact on the plant's vascular system, producing foliar symptoms such as chlorosis, necrosis, and collapse. Traditionally, severity estimation relies on expert visual inspection, which limits diagnostic accuracy. This literature review aims to analyze recent advances in deep learning for the detection and quantification of foliar damage severity in tomato. A review of databases and relevant studies indicates that the integration of neural networks and Transformers, along with the generation of proprietary datasets under real-world conditions, remain underexplored areas for the timely management of severity in tomato crops.

Keywords: neural networks, transformers, severity, *Fusarium oxysporum*, tomato.

1. INTRODUCCIÓN

El tomate es uno de los cultivos hortícolas más relevantes en México, tanto por su importancia económica como por su papel en la seguridad alimentaria. México es uno de los principales exportadores de tomate a nivel mundial, (SIAP, 2023). Sin embargo, el cultivo enfrenta múltiples desafíos fitosanitarios, entre los cuales destacan las enfermedades fúngicas, debido a su frecuencia, impacto y dificultad de control (Larios, Pérez y Rodríguez, 2021).

Entre los patógenos se encuentra el hongo *Fusarium oxysporum*, agente causal de la marchitez vascular de la planta de tomate. Esta enfermedad afecta las raíces y hojas de la planta, comprometiendo el sistema vascular, lo cual provoca síntomas como marchitez, clorosis, necrosis progresiva y, en casos graves, la muerte de la planta (Agrios, 2005). La marchitez vascular tiene carácter endémico en diversas zonas productoras del país y puede ocasionar pérdidas económicas severas si no se detecta y trata de manera oportuna (Jiménez et al., 2022)

Uno de los principales retos en el manejo de la marchitez vascular es la identificación precisa de la severidad del daño foliar. Los síntomas en las hojas pueden confundirse fácilmente con otras enfermedades o con deficiencias nutricionales. Los métodos tradicionales de evaluación dependen de la observación del experto, lo cual introduce subjetividad y limita el diagnóstico. (Bock et al. 2020). Esta situación dificulta la aplicación oportuna de tratamientos adecuados, favoreciendo la propagación del patógeno y generando pérdidas económicas a lo largo de la cadena de producción.

En los últimos años, diversos trabajos han explorado el uso de herramientas de visión computacional e inteligencia artificial para la detección y clasificación de enfermedades en cultivos. Los modelos reportados en estudios previos se centran en la clasificación binaria (sano/enfermo) o en la identificación de la enfermedad, pero son escasos los modelos que buscan estimar la severidad de la infección (Zhang et al., 2023). Los avances recientes en arquitecturas como transformadores de visión ofrecen mayor capacidad para modelar el contexto a partir de imágenes, y son poco explorados en la agrícultura. Además, estas arquitecturas aportan explicabilidad, permitiendo comprender qué elementos de la imagen han influido en la decisión del modelo (Dosovitskiy et al., 2021).

Ante estos retos, surge la necesidad de desarrollar modelos predictivos basados en inteligencia artificial que permitan estimar de forma precisa la severidad del daño foliar. La ciencia de datos aplicada al desarrollo de un modelo predictivo basado en redes neuronales, empleando una arquitectura con transformers, para clasificar y precisar la severidad de la infección foliar causada por *Fusarium oxysporum* en hojas de tomate (Sanida et al., 2023).

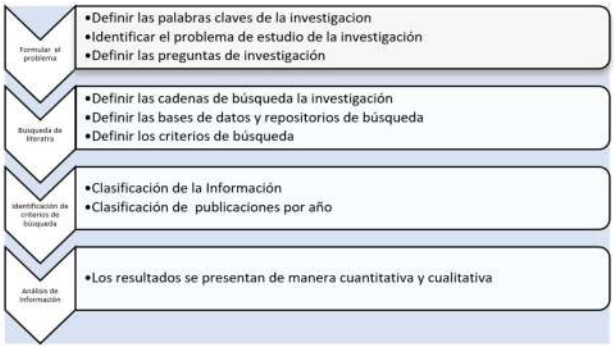
El modelo propuesto integrará diversas estrategias para el procesamiento de imágenes, segmentación foliar y técnicas de aumento, por mencionar algunas, además, la arquitectura con transformer de visión será explorada para modelar una correcta estimación de la severidad. Con este enfoque, se busca contribuir a la ciencia en el área de las ciencias agropecuarias.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Esta sección contiene una descripción respecto a lo que se encuentra publicado recientemente y se dan a conocer los conceptos principales y teorías que contribuyen a la investigación.

La revisión de la literatura en la primera fase de la revisión de literatura se establecieron los conceptos clave que orientan el estudio, se delimitó el tema central de análisis y se formularon las preguntas que guiarán el desarrollo de la investigación. Posteriormente, se diseñaron las combinaciones de términos para la búsqueda de información, se eligieron las bases de datos y repositorios más adecuados y se fijaron los parámetros para localizar las fuentes pertinentes. En la tercera etapa se procedió a organizar la información recopilada, agrupándola según su relevancia para el trabajo y ordenándola de acuerdo con el año de publicación con el fin de observar su evolución en el tiempo. Finalmente, en la fase de análisis se presentaron los resultados obtenidos tanto de manera numérica, mostrando la cantidad y distribución de las publicaciones, como de forma interpretativa, resaltando tendencias, aportaciones y vacíos identificados en la literatura revisada.

Fig. 1. Metodología de revisión de literatura



La Figura 1. ilustra la metodología, para la revisión de la literatura se identificaron diversas bases de datos y repositorios para la búsqueda de la información, los resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de búsqueda de palabras clave.

Base de datos	CNN	LSTM	ViT
Google Scholar	320	280	300
Elsevier	150	120	90
Springer	80	60	50
ACM Digital Library	95	70	65
Total	645	530	505

2.1 Tomate y Fusarium en México

El tomate en México representa un cultivo estratégico que se ve seriamente amenazado por *Fusarium oxysporum*. La manifestación de la enfermedad en las hojas y la relevancia de la severidad como indicador de impacto hacen evidente la necesidad de continuar con investigaciones enfocadas en detección temprana, manejo integrado y desarrollo de variedades resistentes.

La marchitez vascular del tomate causada por *Fusarium oxysporum* reduce el flujo de agua y nutrientes y desencadena un conjunto de señales morfológicas foliares útiles para el diagnóstico temprano y el seguimiento de la enfermedad. Entre los signos iniciales destacan la marchitez diurna reversible y el verde pálido en hojas inferiores; conforme progresa el daño vascular aparecen clorosis (de amarillo claro a intenso), clorosis intervenal con nervaduras verdes persistentes, necrosis marginal y caída prematura de hojas. En fases avanzadas el tejido evoluciona a marrón (necrosis) y finalmente a gris–negruzco (tejido seco). Son frecuentes manchas necróticas irregulares con halo amarillento y distribución asimétrica. En la forma y textura se observan enrollamiento, ondulaciones del contorno, pérdida de turgencia, aspecto opaco y zonas correosas en áreas necróticas.

Este patrón sintomatológico, visible y progresivo, en sistemas productivos donde el tomate es estratégico por su valor nutricional y económico, debido a que México, uno de los principales productores y exportadores mundiales, su producción enfrenta amenazas constantes debido a la incidencia de enfermedades de origen bacteriano, viral y fúngico, las cuales afectan directamente el rendimiento y la calidad del fruto. Estas enfermedades, favorecidas por factores ambientales y por prácticas de manejo inadecuadas, ocasionan pérdidas considerables y representan un desafío para la sostenibilidad de los sistemas productivos.

La Tabla 2. presenta la escala diagramática utilizada para la evaluación visual de la severidad en hojas de tomate afectadas por *Fusarium oxysporum*. Esta escala permite clasificar los niveles de daño foliar con base en el porcentaje de área lesionada, facilitando la estandarización de las observaciones y la comparación entre diferentes estudios de detección y estimación de severidad.

Tabla 2. Escala diagramática para la evaluación de la severidad en hojas de tomate por *Fusarium oxysporum*

Grado	% de área afectada	Descripción visual
0	0 %	Hoja sana, sin síntomas
1	1 – 5 %	Pequeñas lesiones aisladas
2	6 – 10 %	Lesiones más evidentes, pero la mayoría del tejido sano
3	11 – 25 %	Manchas bien desarrolladas, avance moderado
4	26 – 50 %	Gran parte de la hoja dañada, reducción fotosintética importante
5	51 – 75 %	Hoja con necrosis avanzada, función severamente afectada
6	76 – 100 %	Hoja completamente seca o colapsada

Como se observa, los niveles de severidad se definen de manera progresiva desde hojas sanas (0 %) hasta hojas con daño severo (> 75 %), proporcionando una guía visual que permite validar las predicciones del modelo frente a evaluaciones manuales. Esta escala ha sido empleada en trabajos recientes como referencia para la anotación manual de conjuntos de datos (Bock et al., 2020), lo que se considera para su uso en la presente investigación para el entrenamiento y evaluación de modelos de visión computacional.

En la revisión de literatura se analizaron 10 artículos representativos seleccionados por su relevancia en la detección y estimación de severidad foliar en tomate mediante aprendizaje profundo, CNN y Transformers. Los trabajos incluidos cumplen criterios de publicación en revistas indexadas entre 2020 y 2024, y fueron clasificados según tipo de modelo, arquitectura, cultivo y principales resultados, la Tabla 3. muestra en resumen.

Tabla 3. Artículos base considerados en la revisión de literatura.

Autor (Año)	Arquitectura	Cultivo	Objetivo	Principales resultados
Sanida et al. (2023)	CNN + Transfer Learning	Tomate	Clasificación de enfermedades foliares	Precisión 97.5 %
Thanjaivadivel et al. (2024)	Vision Transformer	Tomate	Estimación de severidad	Precisión 98.9 %
Arshad et al. (2023)	CNN híbrido	Papa	Detección multiclase de enfermedades	Precisión 98.5 %
Barman et al. (2024)	ViT + Smartphone	Varios	Diagnóstico de enfermedades agrícolas	Precisión 96.7 %
Valle-Medina et al. (2025)	ViT	Papa	Clasificación foliar	Precisión 95.4 %

La sistematización cuantitativa de los estudios revisados permitió identificar que los modelos híbridos CNN–ViT ofrecen mejor rendimiento promedio (96 %) frente a las arquitecturas tradicionales, además de mayor interpretabilidad y capacidad de generalización bajo condiciones reales.

2.2 Preprocesamiento de imágenes

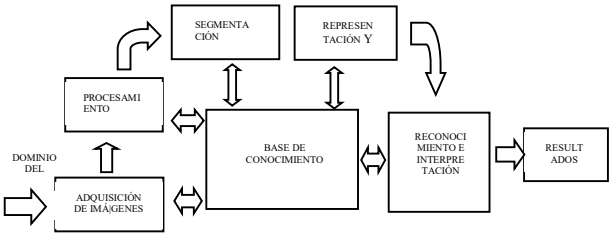
En el procesamiento digital de imágenes se extraen, mejoran y transforman características visuales relevantes a partir de hojas infectadas, generando datos consistentes y representativos para modelos de aprendizaje profundo. Las técnicas utilizadas incluyen segmentación foliar, eliminación de fondo irrelevante, ajuste de tamaño y resolución, así como aumento de datos (data augmentation), lo que asegura uniformidad y aporta variabilidad al conjunto de entrenamiento (Szeliski, 2022).

En términos generales, el procesamiento de imágenes abarca diversas fases: adquisición de imágenes mediante sensores ópticos; procesamiento inicial para reducción de ruido y normalización; segmentación que delimita áreas sanas y enfermas; extracción de características como bordes, texturas y formas; clasificación automática para asignar etiquetas a los patrones visuales, y finalmente, la interpretación que permite generar decisiones diagnósticas o recomendaciones de manejo. Este enfoque interdisciplinario, que integra matemáticas, computación, óptica e inteligencia artificial (González y Woods, 2018; Szeliski, 2022), constituye la base de los sistemas modernos de visión por computadora aplicados en la agricultura.

La implementación de estas técnicas no solo mejora la calidad y consistencia de los datos, sino que también facilita un diagnóstico rápido, preciso y escalable, optimizando el control fitosanitario y contribuyendo a la sostenibilidad en la producción de tomate.

En la Figura 2. se muestran las principales etapas del preprocesamiento de imágenes, desde la adquisición hasta la segmentación y reconocimiento

Fig. 2. Etapas del preprocesamiento de imágenes (González y Woods 2018).



2.3 Aprendizaje profundo

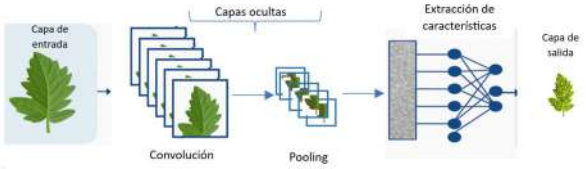
El aprendizaje profundo es una subdisciplina del aprendizaje automático dentro de la inteligencia artificial. Se basa en el uso de redes neuronales, capaces de aprender representaciones jerárquicas a partir de grandes volúmenes de datos. A diferencia de los métodos tradicionales, estas redes no requieren una extracción manual de características, ya que cada capa aprende progresivamente desde patrones simples, como bordes y texturas, hasta estructuras semánticas más complejas (Rumelhart, Hinton y Williams, 1986; Goodfellow, Bengio y Courville, 2016).

Una de las tareas más importantes en el aprendizaje profundo es la clasificación supervisada, cuyo objetivo es asignar etiquetas a nuevas instancias en función de ejemplos previamente anotados. Este proceso puede ser binario, multiclase o multietiqueta, y su desempeño se evalúa mediante métricas como la precisión, la sensibilidad, la exactitud, la medida F1 y las matrices de confusión (Alpaydin, 2020; Zhou, 2021). En la agricultura, la clasificación mediante aprendizaje profundo ha mostrado gran eficacia en la identificación de enfermedades foliares en tomate y otros cultivos, permitiendo distinguir con alta exactitud distintos tipos de infecciones (Krizhevsky, Sutskever y Hinton, 2012).

Las redes neuronales convolucionales han sido ampliamente adoptadas para el procesamiento de imágenes, ya que integran operaciones de convolución para la extracción de características, capas de agrupamiento para reducir dimensionalidad y capas totalmente conectadas para la clasificación final (LeCun, Bengio y Hinton, 2015). Estas arquitecturas han logrado resultados notables en la detección de enfermedades en hojas de tomate, alcanzando niveles de precisión superiores al 95 % en distintos estudios (Pandey et al., 2024).

La Figura 3. representa de manera esquemática la estructura general de una red neuronal utilizada para la clasificación de enfermedades foliares

Fig. 3. Red neuronal.



De manera más reciente, los transformadores de visión han emergido como una alternativa disruptiva, pues modelan relaciones globales en las imágenes mediante mecanismos de autoatención. A diferencia de las redes convolucionales, que aprenden patrones locales y los combinan en niveles jerárquicos, los transformadores consideran interacciones entre cualquier parte de la imagen desde el inicio del procesamiento, logrando superar a modelos tradicionales cuando se dispone de grandes volúmenes de datos (Dosovitskiy et al., 2020). Estas arquitecturas han sido aplicadas con éxito en agricultura de precisión, donde superan a los modelos clásicos de redes convolucionales en la identificación de enfermedades foliares en tomate (Sanida et al., 2023; Thanjaivadivel et al., 2024).

En conjunto, el aprendizaje profundo, las redes convolucionales y los transformadores de visión han revolucionado el reconocimiento de patrones visuales, ofreciendo mayor precisión, escalabilidad y capacidad de generalización en el diagnóstico de enfermedades en cultivos. Su integración en sistemas inteligentes agrícolas representa un avance fundamental para el diagnóstico temprano, la reducción de pérdidas y el fomento de la sostenibilidad productiva.

El desarrollo de modelos basados en *Vision Transformers* (ViT) ha representado un avance significativo en el campo de la visión por computadora aplicada a la agricultura de precisión. A diferencia de las redes neuronales convolucionales (CNN), que analizan características locales mediante filtros espaciales, los ViT emplean un mecanismo de *autoatención* que permite capturar dependencias globales dentro de la imagen, lo que resulta especialmente útil para identificar patrones complejos en las hojas de las plantas (Dosovitskiy et al., 2020). Este enfoque ha mostrado una alta capacidad para detectar síntomas sutiles de enfermedades foliares, como necrosis, clorosis o variaciones cromáticas, que suelen presentarse de manera dispersa o irregular en la superficie de la hoja.

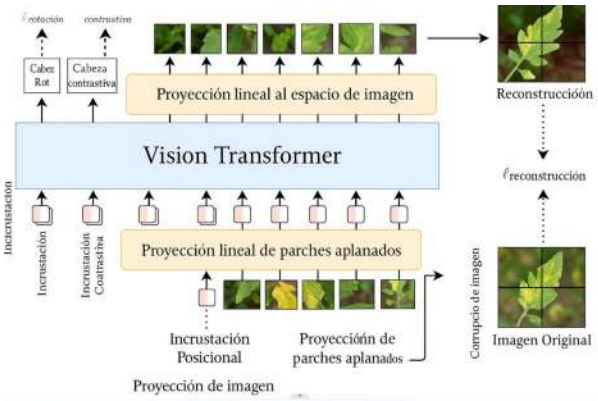
El modelo ViT divide la imagen en pequeños parches o fragmentos que se representan como vectores de características, los cuales son procesados como una secuencia similar a un texto en un modelo de lenguaje. A través del mecanismo de autoatención multicabeza, el modelo aprende qué regiones de la imagen son más relevantes para la tarea de clasificación, lo que mejora la interpretabilidad de los resultados (Khan et al., 2023). En el contexto de la fitopatología computacional, esta capacidad permite identificar correlaciones espaciales entre zonas sanas y lesionadas, brindando una visión más integral del daño foliar. Por ejemplo, en cultivos de tomate, papa o uva, los ViT han alcanzado niveles de precisión superiores al 98 %, superando el rendimiento de modelos clásicos como VGG16 o ResNet50 (Arshad et al., 2023).

Además, los ViT han demostrado ser eficaces para integrar información adicional, como datos ambientales o temporales, mediante mecanismos de atención cruzada y embeddings contextuales. Estas estrategias permiten que el modelo relacione las condiciones climáticas o de cultivo con la manifestación visual de los síntomas, generando diagnósticos más precisos y adaptables a diferentes escenarios agrícolas (Barman et al., 2024). De esta manera, los ViT no solo clasifican las enfermedades, sino que también pueden estimar su severidad, predecir la progresión del daño y asistir en la toma de decisiones agronómicas.

El uso de ViT también contribuye a la automatización del monitoreo agrícola. Su integración con sistemas de captura de imágenes por drones, sensores o cámaras permite construir plataformas inteligentes para la detección temprana de enfermedades. Estas herramientas favorecen la reducción del uso de pesticidas, la optimización de recursos y la mejora del rendimiento de los cultivos. Sin embargo, uno de los principales retos de los ViT radica en su alta demanda computacional y en la necesidad de grandes volúmenes de datos etiquetados para un entrenamiento adecuado (Zhou, 2021). Para mitigar este problema, se han propuesto estrategias de *transfer learning* y modelos híbridos CNN–ViT, que aprovechan las ventajas de ambos enfoques: la capacidad de las CNN para extraer detalles locales y la fuerza de los ViT para modelar relaciones globales (Valle-Medina et al., 2025).

La Figura 4. muestra la arquitectura general del modelo (ViT) aplicada al procesamiento y análisis de imágenes de hojas de plantas. En este esquema se ilustra cómo la imagen original es dividida en pequeños parches o fragmentos, los cuales son convertidos en vectores mediante una proyección lineal que conserva la información espacial y de color. Cada parche recibe una *incrustación posicional* que permite al modelo reconocer su ubicación dentro de la imagen completa. Posteriormente, los vectores generados se ingresan al codificador del Transformer, donde los mecanismos de autoatención identifican relaciones globales entre las diferentes regiones de la hoja, capturando patrones de textura, color y estructura asociados a posibles síntomas de enfermedad. Finalmente, el modelo reconstruye la imagen a partir de las representaciones aprendidas o genera salidas específicas para tareas de clasificación o predicción de severidad. Esta arquitectura permite al ViT analizar de manera contextual la información visual, superando las limitaciones de los modelos convolucionales tradicionales.

Fig. 4. Arquitectura vision transformer.



3. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

El análisis del estado del arte muestra las implicaciones de la inteligencia artificial, aprendizaje profundo y visión por computadora para el diagnóstico de enfermedades en cultivos agrícolas. Se ha consolidado el uso de redes neuronales convolucionales, como la técnica más empleada para tareas de clasificación de enfermedades foliares en plantas, debido a su eficacia en la extracción de características.

En el análisis cualitativo se identificaron fortalezas y limitaciones en los estudios revisados. Entre las fortalezas, destaca la tendencia hacia arquitecturas híbridas CNN–ViT y la inclusión de datasets específicos para cultivos agrícolas. Sin embargo, se observan en el uso de imágenes tomadas en condiciones controladas, que limita la generalización en campo; por otro lado, la escasez de conjuntos de datos multitemporales y multiespectrales; la falta de métricas unificadas para evaluar severidad. Estas limitaciones se consideran factores críticos que la presente investigación busca fortalecer con la construcción de un dataset propio en condiciones reales de invernadero y la integración de información contextual y temporal en el modelo propuesto.

No obstante, se identifica que la mayoría de estos trabajos se han centrado en tareas de clasificación binaria (sano/enfermo) o en la identificación de la presencia de enfermedades específicas, pero no en la estimación del grado de severidad, la gran mayoría de los modelos revisados se han entrenado con datasets públicos como PlantVillage, que, aunque útiles, presentan imágenes tomadas en condiciones controladas que no representan adecuadamente las condiciones reales del campo agrícola.

Por otro lado, se observa una evolución metodológica hacia arquitecturas híbridas avanzadas, modelos con CNN (redes neuronales convolucionales) y LSTM (Memoria a corto y largo plazo), por otro lado, los Transformer, y ViT (Vision Transformer) han sido recientemente explorados en contextos agrícolas y en dominios como la medicina, donde la capacidad de los Transformers para captar relaciones globales en las imágenes aporta ventajas importantes. Por otro lado, se identifica que uso de Transformers en combinación con CNN puede mejorar tanto la clasificación como la segmentación semántica y la estimación de severidad en las hojas. En el caso particular de esta investigación, que busca el desarrollo de un modelo con Transformers en combinación con CNN, para clasificar y estimar la severidad de la infección foliar causada por *Fusarium oxysporum* en tomate.

Adicionalmente, en este proyecto se considera la construcción de un dataset propio con imágenes reales tomadas en el invernadero del "Huerto Escuela" del ITAT. La literatura revisada identifica la carencia de datasets públicos que reflejen condiciones reales, lo que limita la capacidad de generalización de los modelos existentes. En resumen, la literatura revisada identifica que las CNN han dominado tradicionalmente la clasificación de enfermedades en cultivos, las arquitecturas basadas en Vision Transformer es un campo de estudio para las tareas como la estimación de severidad.

Actualmente, se encuentra en desarrollo la fase experimental del modelo CNN–ViT, en la que se están realizando pruebas preliminares con la integración del conjunto de datos con imágenes obtenidas en condiciones controladas del invernadero del ITAT. Estos resultados iniciales permitirán validar la precisión del modelo propuesto y sentar las bases para su implementación en condiciones reales de campo.

4. CONCLUSIONES

La revisión de la literatura demuestra que la marchitez vascular causada por *Fusarium oxysporum* representa una amenaza para la producción de tomate en México y a nivel mundial, siendo la estimación precisa de su severidad un desafío aún no resuelto de manera efectiva. Los métodos tradicionales de inspección visual presentan limitaciones de subjetividad y baja reproducibilidad, lo que evidencia la necesidad de soluciones tecnológicas más objetivas.

Los estudios revisados evidencian que las redes neuronales convolucionales (CNN) son actualmente el método más empleado para la clasificación de enfermedades en cultivos agrícolas, debido a su capacidad para extraer características locales relevantes como texturas, bordes y coloraciones anormales. Sin embargo, las arquitecturas de Transformers de visión (ViT) han emergido como un enfoque más robusto, capaz de modelar relaciones espaciales globales dentro de las imágenes, mejorando la interpretación y precisión en la detección de síntomas de necrosis, clorosis o marchitez. La integración de ambos enfoques en modelos híbridos CNN–ViT ha mostrado un aumento en la capacidad de generalización, alcanzando niveles de precisión superiores al 96 % en escenarios experimentales controlados.

Asimismo, la literatura resalta la necesidad de construir datasets propios en condiciones reales de campo, ya que la mayoría de los estudios emplean bases de datos públicas como *PlantVillage*, obtenidas en entornos artificiales que no representan la variabilidad lumínica, ambiental ni fisiológica del cultivo. La generación de un conjunto de datos propio como el propuesto en esta investigación constituye una contribución relevante, ya que permitirá validar los modelos

bajo condiciones reales y fortalecer su aplicabilidad agronómica.

En este sentido, la integración de CNN y Transformers en un enfoque híbrido constituye una línea de investigación que puede aportar modelos más precisos, explicables y escalables para la gestión fitosanitaria del tomate. Con ello, se contribuye no solo a la reducción de pérdidas económicas y productivas, sino también al fortalecimiento de la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola.

El análisis comparativo de los artículos revisados permite concluir que el uso de modelos híbridos CNN–ViT, complementado con información contextual o temporal, puede revolucionar la estimación de severidad en hojas de tomate. Estos modelos no solo aportan mayor precisión diagnóstica, sino que también ofrecen explicabilidad, un atributo esencial para comprender las decisiones del sistema y fomentar la confianza en su uso dentro de entornos agrícolas. Además, la integración de estos modelos con plataformas digitales, sensores o drones abre nuevas perspectivas para el monitoreo automatizado de la salud vegetal, reduciendo costos operativos y mejorando la sostenibilidad de los sistemas productivos.

Finalmente, esta revisión destaca que el futuro de la fitopatología computacional se orienta hacia modelos multimodales capaces de analizar información visual, ambiental y temporal de manera conjunta. La aplicación de arquitecturas híbridas CNN–ViT, entrenadas con datos obtenidos en condiciones reales, representa una oportunidad para avanzar hacia un diagnóstico más temprano, preciso y escalable de enfermedades en el tomate y otros cultivos estratégicos. En este contexto, la presente investigación sienta las bases metodológicas para el desarrollo de un modelo que no solo detecte, sino que estime cuantitativamente la severidad foliar, contribuyendo al manejo integrado de enfermedades y a la seguridad alimentaria.

REFERENCIAS

Arshad, F., Mateen, M., Hayat, S., Wardah, M., Al-Huda, Z., Gu, Y. H., & Al-Antari, M. A. (2023).

Barman, U., Sarma, P., Rahman, M., Deka, V., Lahkar, S., Sharma, V., & Saikia, M. J. (2024). ViT-SmartAgri: Vision Transformer and smartphone-based plant disease detection for smart agriculture. Agronomy, 14(2), 327.

Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M.,

Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J., & Houlsby, N. (2020). An image is worth 16×16 words: Transformers for image recognition at scale. International Conference on Learning Representations (ICLR).

Khan, A., Rauf, Z., Sohail, A., Rehman, A., Asif, H., Asif, A., & Farooq, U. (2023). A survey of the vision transformers and their CNN-transformer based variants. Artificial Intelligence Review, 56, 2917–2970.

Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. Advances in Neural Information Processing Systems, 25, 1097–1105.

PLDPNet: End-to-end hybrid deep learning framework for potato leaf disease prediction. Alexandria Engineering Journal, 78, 406–418.

Larios, J., Pérez, M., & Rodríguez, H. (2021). Impacto de las enfermedades fúngicas en cultivos hortícolas. Revista Mexicana de Fitopatología, 39(2), 123–135

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. Nature, 521(7553), 436–444.

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. Nature, 323(6088), 533–536.

Sanida, T., Sideris, A., Sanida, M. V., & Dasygenis, M. (2023). Tomato leaf disease identification via two–stage transfer learning approach. Smart Agricultural Technology, 5, 100275.

SIAP. (2023). Avances de siembras y cosechas: Tomate rojo (tomate). Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera.

Szeliski, R. (2022). Computer vision: Algorithms and applications (2nd ed.). Springer.

Thanjaivadivel, M., Gobinath, C., Vellingiri, J., Kaliraj, S., & Josephin, J. S. F. (2025). EnConv: Enhanced CNN for leaf disease classification. Journal of Plant Diseases and Protection, 132, 32.

Valle-Medina, F., Castillo-Heredia, L., Correa-Peralta, M., & Guzmán Seraquive, J. (2025). Clasificación de enfermedades en hojas de papa utilizando Transformadores de Visión. Novasinergia, 8(1), 142–156.

Zhou, Z.-H. (2021). Machine learning (2nd ed.). Springer.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Medical-AId, a platform for medical services assisted by mobile, web, and AI devices

Vázquez Tiscareño, Raúl *, Valtiérrez Angel, David Arnoldo *, González Hernández, Jorge Luis*, Derma Olivas, Paula Celina *, Valtiérrez Fierro, David Angel *,

Fierro Villarreal, Victorina**

** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Delicias, Paseo Tecnológico Km 3.5 Cd. Delicias, Chihuahua, México. C.P. 33000. (Tel: (667) 888-5000; e-mail: raul.vt@delicias.tecnm.mx; david.va@delicias.tecnm.mx; jorge.gh@delicias.tecnm.mx; l22540561@delicias.tecnm.mx; l24540191@delicias.tecnm.mx)*

*** Centro de Estudios Tecnológicos Ind. y de Serv. #87. Av. Tecnológico s/n, Centro. Cd. Delicias, Chihuahua, México. C.P. 33100. (Tel: (639) 474 4958; e-mail: vickyfierro04@gmail.com)*

Abstract: This study proposes the implementation of Medical-Aid, an intelligent platform designed with the aim of improving access to and quality of health services in México, especially in contexts where millions of people lack effective medical care. Faced with institutional collapse and a lack of technological tools for managing medical records, Medical-AId proposes a mobile and web-based solution based on artificial intelligence that allows for the efficient and secure organization, analysis, and use of medical information. The platform facilitates automated triage, determining the order and priority of care, risk prediction, patient monitoring, and real-time clinical decision-making. Its modular design allows it to adapt to different levels of care, from community centers to specialized hospitals, promoting interoperability between public and private systems. Medical-AId does not seek to replace medical personnel, but rather to enhance their response capacity through ethical, transparent, and validated technology. Its implementation contributes to improving clinical traceability, that is, the ability to periodically and systematically monitor a patient's history and movement, their data, and medications used during their medical care, from the start of treatment until the patient is discharged and ensure more equitable care, especially in marginalized areas. For its analysis, a quantitative paradigm is used. Participants were selected using a simple random sampling of 5 clinical offices for a universal population of 152 patients, obtaining a representative sample "n" of 109 patients surveyed, with a confidence level of 95% and a sampling error of 5%, research line LGAC-2022-DELI-ISCO-225: "Technology development and innovation", prioritizing patients with active clinical history and doctors who have experienced communication failures in Cd. Delicias, Chihuahua, México.

Keywords: Artificial Intelligence, Health Services, Patient, Medical Staff, Mobile and Web App, Automated Triage, Clinical Traceability.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, México atraviesa una crisis profunda en el acceso y la calidad de los servicios de salud. Según CONEVAL (2022), citado por Becerra (2024), "en México, 50.4 millones de personas carecen de acceso a servicios de salud, lo que significa el 39.1% de la población". México Pragmático (2024), lo considera "un indiscutible fracaso de la gestión sanitaria", señalando que "esta carencia aumentó con la creación del INSABI, al pasar del 16.2% en 2018 (20.1 millones) al 39% en 2022 (50.4 millones)" y afirmando que "nunca en la historia de nuestro sistema se había producido un retroceso en cobertura de atención de esa magnitud". Entre otros, "uno de los factores críticos es la deficiente comunicación entre médicos y pacientes, identificada como segunda causa de negligencias médicas en México" (Federación Mexicana de Diabetes, 2015). Esto deriva en errores de medicación, diagnósticos incorrectos y baja adherencia al tratamiento. El impacto es grave por el mal manejo del historial clínico. Según IBM Education (2023), "83% de pacientes señalan la mala comunicación como el peor aspecto de su experiencia, y necesidad de mejor comunicación con médicos". Uno de los factores para hacer frente a esta problemática es la adopción de herramientas inteligentes como apoyo a la gestión médica de los pacientes. En este sentido, según "Statista (s.f.) citado por IBM Education (2023), "prevé que el mercado de la salud basada en IA, valorado en 11,000 millones de dólares en 2021, alcance los 187,000 millones en 2030", lo cual lo convierte en una opción totalmente viable ya que, el origen del problema está también detectado en la falta de herramientas tecnológicas eficientes para una gestión adecuada del historial médico. Por ende, se justifica el eje transversal de Tecnologías emergentes, utilizando la IA para apoyo clínico, pues la adopción de herramientas más avanzadas sigue siendo limitada. Medical-Aid, surge como una solución innovadora de IA apoyando el diagnóstico clínico y mejorando la comunicación médico-paciente. Su plataforma dual (App móvil para pacientes y web para médicos), optimiza la gestión de información clínica, reduce errores y mejora la adherencia al tratamiento.

Derivado de lo anteriormente expuesto, en este estudio se propone una herramienta informática para dispositivos móviles y entorno de la Web denominada **Medical-Aid**, que

permite simplificar la gestión administrativa de los médicos que demandan soluciones informáticas de fácil acceso combinada con doy, importantes modelos de inteligencia artificial: Un modelo Clasificador utilizado para el triage de pacientes, clasificando síntomas, diagnósticos preliminares, etc., y además, es un modelo Recomendador, ya que puede sugerir intervenciones médico-quirúrgicas, recomendar especialistas o acciones preventivas como recordatorios de citas. ***Actualmente este es un prototipo funcional, pero aún en desarrollo***. Su arquitectura técnica está probada y para asegurar la **ética y privacidad** de datos médicos, se incorporaron protocolos de cifrado y autenticación reforzada.

1.1 Planteamiento del Problema

¿Cómo proveer al paciente el acceso equitativo, eficiente y sostenible a servicios de salud de calidad, ante la ausencia de tecnologías emergentes que permitan gestionar a pacientes sin atención médica efectiva?

Fig. 1. Sistema de salud en México.
Fuente: Universidad del Valle de México. UVM (2022).

1.2 Objetivo General

Desarrollar e implementar una plataforma inteligente Móvil y Web, de apoyo clínico basada en tecnologías emergentes, que permita gestionar de forma eficiente, equitativa y sostenible el historial médico de la población mexicana sin acceso efectivo a servicios de salud, optimizando la toma de decisiones médicas.

1.3 Hipótesis

La implementación de una plataforma inteligente como Medical-AId basada en tecnologías emergentes para apoyo clínico, optimiza la toma de decisiones médicas y amplía el acceso equitativo de pacientes a servicios de salud en México.

2. ANTECEDENTES.

En el contexto actual, México atraviesa una crisis estructural en el acceso y calidad de los servicios de salud, marcada por retrocesos en la cobertura, deficiencias en la comunicación médico-paciente y una limitada adopción de tecnologías emergentes. En primer lugar, la eliminación del denominado Seguro Popular y la creación del Instituto de Salud para el Bienestar (INSABI) provocaron una caída significativa en la cobertura efectiva. Según México Evalúa (2023), "El daño por el desmantelamiento del Seguro Popular ya es innegable: en 2022 el número de personas sin acceso a servicios de salud llegó a 50 millones, orillando a más gente a recurrir a servicios médicos privados, a merced de los gastos catastróficos". Según IMCO (2023), "Las sucesivas transiciones entre el Seguro Popular, el INSABI y ahora al IMSS-BIENESTAR presentan un reto para la adecuación presupuestaria y al mismo tiempo, no garantizan un freno al deterioro en el acceso a los servicios de salud". Por otra parte, de acuerdo con estimaciones del CONEVAL (2023), apuntan que "3.9 % de hogares en México incurrió en gastos catastróficos en salud en 2020, es decir, 1,377,055 hogares. El 4.6 % de los hogares con ingresos por debajo de la Línea de Pobreza Extrema realizó un gasto catastrófico en salud".

Fig. 2. Gastos catastróficos por pago de servicios médicos 2022. Fuente: México Evalúa (2023).

Para complicar el panorama, Méndez (2024) advierte que "Históricamente, el gasto en salud ha mantenido una brecha presupuestaria de más de 3 puntos del PIB. A nivel internacional, sugiere una inversión mínima en sector salud del 6% del PIB y México invierte menos de la mitad", lo que evidencia una simulación presupuestaria que debilita la atención médica pública, y se agrega que existen médicos que gestionan la información de sus pacientes con expedientes físicos manejados manualmente o utilizando sistemas no integrados. Esto provoca pérdida de datos, duplicación de esfuerzos, error en diagnósticos y tratamientos, además de una carga administrativa. Por su parte, los pacientes tratan de resolverlo usando agendas personales, recordatorios informales y llamadas para coordinar citas, recetas o aclaraciones. Esto provoca malestar y frustración en el paciente ya que genera confusión, olvidos y falta de seguimiento, lo que disminuye su adherencia al tratamiento afectando gravemente su salud. Mientras que el problema principal del médico es la fragmentación de información, la dificultad de comunicación con pacientes y, sobre todo, perder tiempo en procesos burocráticos.

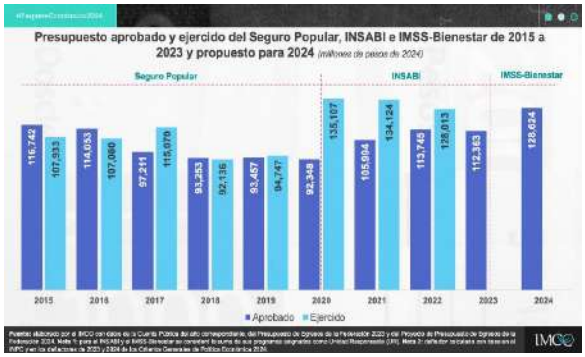


Fig. 3. Presupuesto aprobado del Seguro Popular, INSABI e IMSS-Bienestar 2024.
Fuente: Instituto Mexicano Para la Competitividad A.C. IMCO (2023).

Adicionalmente, la comunicación deficiente entre médicos y pacientes ha sido identificada como una de las principales causas de negligencia médica en México. Según Romeral (2025), "Un diagnóstico correcto pierde eficacia si no se transmite claramente y una indicación médica puede ser malinterpretada al no explicarse adecuadamente. La comunicación no es un lujo, es una necesidad para seguridad, adherencia al tratamiento y satisfacción del paciente".

Por ello, los pacientes requieren y necesitan el beneficio de un sistema para recordatorios automáticos y control de citas. Y el médico desea como beneficio, la posibilidad de centralizar toda la información médica en un solo lugar, una comunicación fluida con pacientes y una toma de decisiones apoyándose en IA para lograr diagnósticos más acertados. Medical-AId es una solución digital que responde a necesidades reales integrando una app móvil para pacientes y una plataforma web para médicos, ambas conectadas por un sistema con Inteligencia Artificial, cuyos atributos clave de la solución, son un diagnóstico asistido por IA, historial médico centralizado y seguro, agenda de citas automatizada, Chat directo entre pacientes y médico y recetas o medicamentos disponibles en la app. Dentro de sus beneficios se incluyen un mejor control de tratamientos, una reducción de errores médicos, menos carga administrativa para el médico, mayor satisfacción del paciente y un acceso rápido y eficiente a la atención médica.

3. MARCO TEÓRICO

La transformación digital en salud ha generado nuevas oportunidades para mejorar la calidad de la atención médica, especialmente en contextos como la sociedad mexicana, donde persisten desafíos estructurales en cobertura, eficiencia y comunicación clínica. En el ámbito de la telemedicina y la gestión clínica digital, la salud electrónica (e-Salud), juega un rol importante ya que implica la "aplicación de Tic's en sistemas de vigilancia, prevención, promoción y atención a la salud. Incluye agenda de citas, laboratorio clínico, expediente clínico electrónico, prescripción electrónica, apoyo a decisión clínica, uso de dispositivos móviles y atención a distancia con medios digitales" (Díaz de León-Castañeda, 2019). Estos componentes clave permiten mejorar la eficiencia operativa, reducir errores médicos y facilitar el acceso a servicios en zonas marginadas. En México, la implementación de e-Salud ha enfrentado retos como "la fragmentación del Sistema Nacional de Salud, la concentración de tecnologías en algunas zonas del país, elevados costos de TIC y su desconocimiento por médicos y personal administrativo en hospitales, representan retos que e-Salud debe enfrentar para ser exitosa" (Mariscal Avilés, Gil García y Ramírez Hernández, 2012). A pesar de avances institucionales, la adopción sigue siendo desigual y limitada en entornos públicos.

Por otra parte, la comunicación Médico-Paciente y calidad de la atención médica, depende en gran medida de la comunicación. Camarena Robles, Hernández Torres y Fajardo Dolci (2011) señalan que las fallas comunicativas son una causa recurrente de quejas médicas ante la CONAMED, en donde, "los problemas de comunicación ocuparon el 7o. lugar abarcando el 2.6% del motivo global de las quejas, por debajo de: impericia, incidentes, complicaciones, procedimientos innecesarios, insatisfacción del paciente y maltrato". La relación médico-paciente es una interacción interpersonal compleja, influida por factores emocionales, y culturales, entre otros. Moore, Gómez, Kurtz y Vargas (2010), destacan que, "Con el uso de habilidades de comunicación efectiva, se busca aumentar la precisión diagnóstica, la eficiencia en términos de adherencia al tratamiento, y construir un apoyo para el paciente. Una comunicación efectiva promueve la colaboración entre médico y paciente".

En cuanto a la comercialización de aplicaciones digitales para la gestión clínica en la relación médico-paciente, según Mordor Intelligence (2023), "el mercado está impulsado por varios factores, incluida la necesidad de manejar datos de manera más efectiva y optimizar los gastos de atención médica, el crecimiento de las asociaciones público-privadas y el gasto regional en atención médica". Por tal razón, cita este mismo autor que "las tendencias prevén que el mercado crezca a medida que se produzcan oportunidades en la atención de la población con tecnología de inteligencia artificial, imágenes y diagnósticos para generar datos". Adicionalmente, ***como competidores del mercado para Medical-AId, está el portal Ai Superior***, empresa que "ofrece servicios integrales de consultoría en IA diseñados para ayudar a empresas a integrar soluciones, concentrando una amplia gama de empresas del sector salud que ofertan servicios médicos utilizando herramientas de IA" (Ai Superior, 2024). En este mismo portal, se promueven diversas empresas como: ***Ellipsis Health, Tempus, Zebra Technologies***, entre otras.

A nivel Latinoamérica destacan: Medesk, en donde, "el 70% de los usuarios de la plataforma Medesk son los profesionales de la salud de instituciones médicas de Colombia, México y Perú, debido a la interfaz comprensible e intuitiva" (Medesk, 2025), una aplicación que permite "Integración con la historia clínica y la agenda médica y reserva de citas, Chat en vivo, Aplicación MedeskMeet para iOS y Android y Gerente personal para su clínica, a un costo de 10 dólares mensuales". En esta misma plataforma se pueden encontrar otras opciones comerciales más de telemedicina.

Finalmente, en la actualidad Medical-AId se puede posicionar en un mercado en expansión, con oportunidades significativas debido al crecimiento de la salud digital y la demanda de soluciones tecnológicas en el sector salud.

4. METODOLOGÍA

En este estudio se implementó un Enfoque Cuantitativo ya que este paradigma permite medir objetivamente fenómenos sociales mediante variables observables, ya que, "usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías" (Hernández Sampieri, 2010, p. 4) En este caso, se busca cuantificar el impacto de la comunicación médico-paciente y evaluar la eficacia de una aplicación móvil y web como herramienta de mejora. Lo que permitió identificar patrones de error en la gestión clínica, medir niveles de satisfacción y adherencia al tratamiento, así como evaluar la funcionalidad y usabilidad de la App móvil y Web mediante métricas.

4.1 Diseño de Investigación

4.1.1 No experimental, transversal y descriptivo.

Esta selección permite llevar a cabo el estudio en donde se observa y mide el fenómeno en su estado natural. El diseño transversal permite recolectar datos en un solo momento, ideal para evaluar la percepción y experiencia de los usuarios con la app Medical-Aid y de acuerdo con Hernández Sampieri(2010, pp. 152-153), "indagan la incidencia de las modalidades, categorías o niveles de una o más variables en una población. Son estudios puramente descriptivos y cuando establecen hipótesis también son descriptivas (de pronóstico de una cifra o valores)".

4.2 Tamaño y Selección de la Muestra

Se seleccionaron participantes utilizando un muestreo aleatorio simple tomando como referencia 5 consultorios clínicos con una muestra de **población universal de 152 pacientes** atendidos en promedio semanalmente, dando como resultado una muestra **"n"** representativa de **109 pacientes** a encuestar, con un nivel de confianza del 95% (1.96) y un error muestral presente del 5%, utilizando para el análisis y procesamiento de datos el software estadístico **PASW 18**. Priorizando pacientes con historial clínico activo y médicos que hayan experimentado fallas comunicativas. Aunque no representa a toda la población, permite obtener datos relevantes para la validación inicial de la herramienta, no obstante, para efectos del presente estudio, no se puede afirmar que estos resultados representen la opinión de todos los usuarios de la plataforma móvil y web.

$$n = \frac{k^2 * p * q * N}{(e^2 * (\mathrm{N} - 1)) + k^2 * \mathrm{p} * \mathrm{q}} \qquad \textbf{(1)}$$

$$\boldsymbol{n} = \frac{1.96^2 * 0.5 * 0.5 * 152}{(0.05^2 * (152 - 1)) + 1.96^2 * 0.5 * 0.5}$$

$$\boldsymbol{n} = \frac{145.9808}{1.3379}$$

n = <u>109</u>

4.3 Instrumento de recolección de datos

Se utilizó un Cuestionario autoadministrado, ya que, de acuerdo con Hernández Sampieri, et al (2010, p. 235), "se proporciona directamente a los participantes", es decir a cada paciente, y de esta forma se minimiza el sesgo de los resultados cuando se apoya con la participación de intermediarios.

4.4 Funcionalidad de las aplicaciones y evaluación técnica

4.4.1 App móvil para pacientes

Desarrollada con ***Jetpack Compose Multiplatform y conectada mediante una API en Python (Flask)***. Los usuarios podrán registrar medicamentos, programar citas y revisar recordatorios.

Fig. 4. Desarrollo de la Plataforma Móvil 2025.
Fuente: (Elaboración propia, 2025).

4.4.2 Web para médicos

Esta aplicación web esta desarrollada con HTML, CSS, Bootstrap (Front End) y PHP, JS (Back End). Permite iniciar sesión, registrar pacientes y acceder a información clave. Incluye una página de inicio informativa con enlaces de descarga y descripción de funciones.

Fig. 5. Pantallas de la Aplicación Web para Personal Médico.
Fuente: (Elaboración propia, 2025).

La base de datos esta desarrollada utilizando un gestor en MySQL, una base de datos relacional de código abierto para aplicaciones web y móviles por su alto rendimiento, una excelente seguridad robusta, gran escalabilidad y, sobre todo, compatibilidad con plataformas y lenguajes de programación conectando ambos sistemas y permitiendo el acceso más eficiente a consultas, registros, control departamental, etc.

5. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Medical-AId es una solución digital tecnológica e innovadora en Tecnologías Emergentes con Inteligencia Artificial como apoyo a la toma de decisiones de los médicos en diagnóstico clínico. Es una App inteligente, una solución digital que mejora la atención médica conectando a médicos y pacientes a través de una plataforma web y una aplicación móvil. Su **objetivo** es facilitar el seguimiento clínico, el manejo de citas y el control de medicamentos, de forma segura y organizada implementando una plataforma inteligente Móvil y Web, de apoyo clínico. La plataforma web está diseñada para médicos. Desde ahí pueden registrar pacientes, consultar historiales clínicos, dar seguimiento a tratamientos y gestionar citas. La App móvil está hecha para los pacientes. Les permite agendar o revisar citas, llevar un control de sus medicamentos y comunicarse fácilmente con su médico, alineándose con el tratamiento clínico prescrito para cada uno de los pacientes.

Esta aplicación móvil y web está pensada para médicos generales, clínicas públicas y privadas, hospitales pequeños y pacientes que buscan un mejor control de su salud sin tantas complicaciones y dificultades.

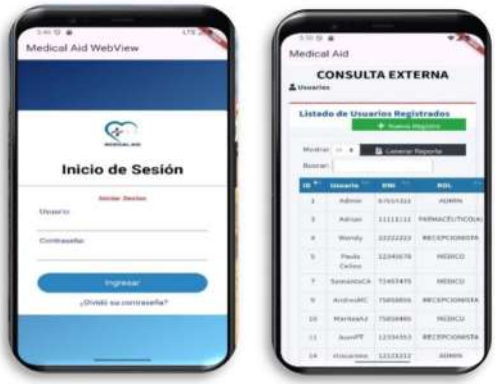


Fig. 6. Pantallas de la Aplicación Móvil para pacientes. Fuente: (Elaboración propia, 2025).

Entre sus principales beneficios y ventajas destacan: Agenda citas en tiempo y forma, ahorra tiempo en consultas y registros, mejora la comunicación entre médicos y pacientes, disminuye errores en el tratamiento o la toma de medicamentos, permite un seguimiento más preciso de la salud del paciente y puede incluir nuevas funciones en el futuro.
A diferencia de otras herramientas, Medical-AId ofrece una experiencia completa y conectada en tiempo real. Está hecha con tecnología moderna, funciona en computadoras y celulares, y su diseño es fácil de usar para cualquier persona.
Medical-AId no requiere conocimientos técnicos para aprovechar sus beneficios. Su meta es ayudar a que más usuarios tengan acceso a una atención médica más clara, rápida, eficiente y organizada en términos de calidad y excelencia. Por otra parte, la **hipótesis** formulada para este estudio aportó evidencia a favor ya que Medical-AId permitió optimizar la toma de decisiones médicas y puede ampliar el acceso equitativo de pacientes a servicios de salud en México. A continuación, un extracto de los gráficos más representativos de este estudio de elaboración propia.

En cuanto a los resultados obtenidos en el cuestionario aplicado, en la figura 7, destaca que un **48.62%**, es decir, 53 pacientes de los **109 encuestados**, considera la situación muy grave en la saturación de servicios médicos públicos.

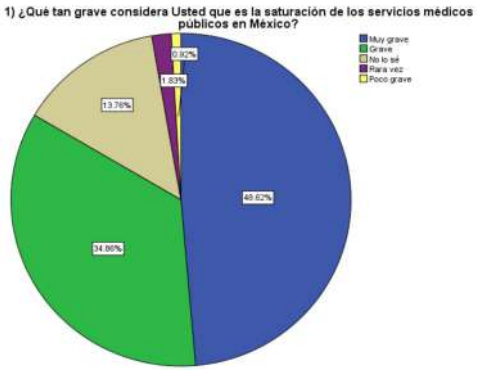


Fig. 7. opinión publica sobre los servicios de salud pública.

Por otra parte, en la figura 8, un **81.65%**, con 89 pacientes, considera que la atención a pacientes suele ser muy lenta, lamentablemente, este es un histórico que ha prevalecido a través de diferentes estudios y épocas en la sociedad mexicana.

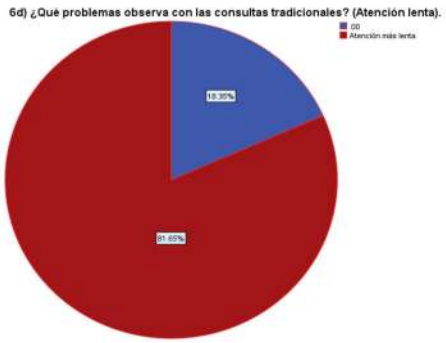


Fig. 8. Atención lenta por parte de los servicios médicos.

Como consecuencia de un seguimiento clínico poco eficiente, en la figura 9, se observa que un **82.57%**, con 90 pacientes, considera que existe un agravamiento en las enfermedades.

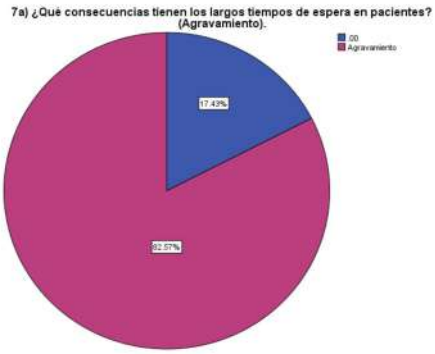


Fig. 9. Gravedad de los pacientes por largos tiempos de espera.

Por otra parte, en la figura 10, un **88.07%** con 96 pacientes, consideran que la implementación de plataformas digitales de atención clínica puede optimizar los servicios de salud.

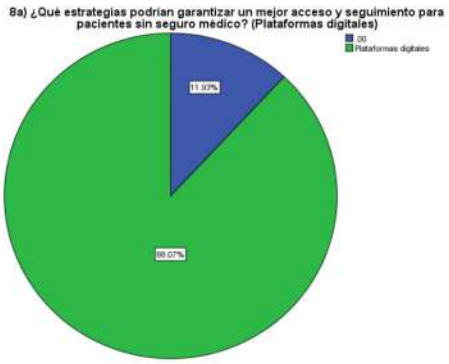


Fig. 10. Uso de plataformas digitales optimizan los servicios.

Finalmente, en la figura 11, un **84.26%**, es decir, 91 pacientes, si considera usar una nueva herramienta de IA para gestionar sus consultas, como Medical-Aid aplicada a servicios médicos, lo cual la hace una propuesta viable.

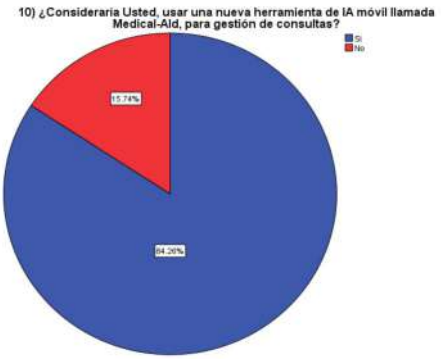


Fig. 11. Uso de la nueva herramienta digital clínica Medical-Aid.

6. CONCLUSIONES

La solución Medical-AId puede incursionar exitosamente en el mercado de tecnologías emergentes de software de respuesta a emergencias ya que esta alineada con el código "SCIAN 621512: Diagnóstico del sector público. Unidades económicas del sector público dedicadas principalmente a proporcionar servicios de diagnóstico para las personas" (INEGI, 2023).

Se considera que, para destacar en el ámbito clínico, un apoyo fundamental es la incorporación de herramientas digitales inteligentes que pueden facilitar una comunicación más clara, accesible y personalizada, reduciendo barreras semánticas y estructurales. De ahí surge la propuesta de implementar la Inteligencia Artificial en Salud pública. La inteligencia artificial (IA) representa una innovación disruptiva en el sector salud, por ende, "La inteligencia artificial promete una transformación significativa del cuidado de la salud en todas las áreas médicas. El futuro de las especialidades médicas obligará a los médicos a evolucionar y emplearla como una herramienta en la atención del enfermo" (Lanzagorta Ortega, Carrillo Pérez y Carrillo Esper, 2023). Sin embargo, la adopción de IA enfrenta desafíos éticos, regulatorios y técnicos. La falta de infraestructura, la escasa capacitación profesional y la necesidad de garantizar la privacidad de los datos son obstáculos que deben abordarse para lograr una implementación efectiva y equitativa. En Medical-Aid, como Métricas Clave y su aplicación se pretende mejorar la *Experiencia de Usuario* (UX) actual en el prototipo funcional aquí propuesto para medir la **Tasa de retención**, es decir, cuántos pacientes del 84.26% que están dispuestos a utilizar esta nueva aplicación, terminan regresando para continuar con su uso, después de la primera semana o mes. En este contexto, un valor alto indica utilidad y satisfacción de los pacientes.

Para una posible línea de investigación futura que venga a complementar este estudio se recomienda abordar el tema de: "*Aplicación de las Tecnologías Móviles Inteligentes para el sector salud en zonas rurales de México*".

Fig. 12. Establecimiento de la misión, visión y valores de la Empresa Medical-AId. Fuente: (Elaboración propia, 2025).

REFERENCIAS

Ai Superior (2024). Principales empresas de inteligencia artificial que revolucionarán la atención médica en 2024. Consultado en: https://aisuperior.com/es/ai-companies-for-healthcare/

Becerra, J. (2024). Carecen 50.4 millones de acceso a servicios de salud: Coneval. Consultado en: https://www.jornada.com.mx/noticia/2024/09/23/sociedad/carecen-50-4-millones-de-acceso-a-servicios-de-salud-coneval-3641

Camarena Robles, Hernández Torres y Fajardo Dolci (2011). La comunicación humana y su relación con la queja médica. Consultado en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://biblat.unam.mx/hevila/RevistaCONAMED/2011/vol16/no3/8.pdf

CONEVAL (2023). Estudio sobre el derecho a la salud 2023: un análisis cualitativo. Consultado en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.coneval.org.mx/EvaluacionDS/PP/CEIPP/IEPSM/Documents/E_Derecho_Salud_2023.pdf

Díaz de León-Castañeda, C. (2019). Salud electrónica (e-Salud): un marco conceptual de implementación en servicios de salud . Gac Med Mex. 2019;155(2):176-183. Consultado en: https://doi.org/10.24875/gmm.18003788

Federación Mexicana de Diabetes (2015). Comunicación deficiente entre médico y paciente, segunda causa de negligencias médicas en México. Consultado en: https://fmdiabetes.org/negligencias-medicas/#:~:text=Seg%C3%BAn%20datos%20de%20la%20Comisi%C3%B3n,en%20las%20instituciones%20de%20salud

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, P. (2010). Metodología de la Investigación. 5ª. Edición. Chile: Editorial Mc Graw Hill.

IBM Education (2023). Los beneficios de la IA en la sanidad. Consultado en: https://www.ibm.com/mx-es/think/insights/ai-healthcare-benefits

IMCO (2023). Sube y baja de los recursos para la salud Consultado en: https://imco.org.mx/sube-y-baja-de-los-recursos-para-salud/

INEGI (2023). Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte, México SCIAN 2023. Consultado en: https://www.inegi.org.mx/scian/ Lanzagorta Ortega, D., Carrillo Pérez, D. y Carrillo

Esper, R.(2023) Inteligencia artificial en medicina: presente y futuro. Consultado en: https://doi.org/10.24875/gmm.m22000688 Mariscal Avilés, J., Gil García, J. y Ramírez

Hernández, F. (2012). e-Salud en México: antecedentes, objetivos, logros y retos. Consultado en: https://biblat.unam.mx/es/revista/espacios-publicos/articulo/e-salud-en-mexico-antecedentes-objetivos-logros-y-retos

Medesk (2025). 5 Plataformas de Telemedicina en América Latina: Funcionalidades y Precios. Consultado en:https://www.medesk.net/es/blog/plataforma-de-telemedicina-en-colombia/#:~:text=En%20el%20sector%20salud%20es%20importante%20asegurarse,los%20pacientes%20acceder%20a%20sus%20medicamentos%20de

Méndez, J. (2024). Evolución del gasto en salud: En 2023, el mayor subejercicio en diez años. Consultado en:
https://ciep.mx/evolucion-del-gasto-en-salud-en-2023-el-mayor-subejercicio-en-diez-nos/#:~:text=En%202023%2C%20el%20gasto%20en%20salud%20present%C3%B3,seguridad%20social%2C%20en%20particular%20en%20la%20SSa_

México Evalúa (2023). Hacia la privatización de facto de la atención a la salud: 2T 2023. Publicado en análisis, Gasto en Salud, Trimestrales. Consultado en: https://numerosdeerario.mexicoevalua.org/2023/08/17/el-remedio-a-la-enfermedad-se-ve-aun-mas-lejos-2t-2023/

México pragmático (2024). 50 millones de mexicanos sin seguro médico, un indiscutible fracaso de la gestión sanitaria. Consultado en: https://mexicopragmatico.com/50-millones-de-mexicanos-sin-seguro-medico-un-indiscutible-fracaso-de-la-gestion-sanitaria/

Moore, P., Gómez, G., Kurtz, S. y Vargas, A. (2010). La comunicación médico paciente: ¿Cuáles son las habilidades efectivas? Consultado en: http://dx.doi.org/10.4067/S0034-98872010000800016

Mordor Intelligence Research & Advisory. (2023). Inteligencia artificial en medicina Tamaño del mercado y análisis de participación tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029). Mordor Intelligence.Consultado en: https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/artificial-intelligence-in-medicine-market

Romeral, A. (2025). Errores en la comunicación con el paciente. Consultado en: https://iefs.es/errores-en-la-comunicacion-con-el-paciente/

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

An overview of cohesion metrics in microservices architectures

Samanta Lara Agapito*, Juan Carlos Rojas Pérez*, Olivia Graciela Fragoso Díaz*, Humberto Hernández Garcia*

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.*

Cuernavaca, Morelos C.P.62490, México (e-mail: {m24ce056, juan.rp, olivia.fd, humberto.hg}@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: The microservices architecture has emerged as a key alternative for developing flexible and scalable software; however, assessing its structural quality remains a challenge, particularly with respect to cohesion. This paper presents a review of recent literature aimed at identifying the cohesion metrics proposed for microservice architectures, analyzing their level of formalization, and examining the existence of reference thresholds. The results reveal a wide variety of metrics, ranging from adaptations of object-oriented approaches (e.g., LCOM, ALCOM) to microservice-specific proposals such as SIDC, C(MSc), and CohT. It was found that, although most metrics include mathematical formalization, others are described only conceptually, making replication and comparison more difficult. Furthermore, no uniform thresholds were identified, as values vary depending on context, programming language, and the characteristics of the analyzed system. These findings highlight the need for a general methodology that enables comprehensive, adaptable, and verifiable evaluation of cohesion, thereby contributing to improved quality in microservice architectures.

Keywords: Microservice Architecture, Cohesion, metrics, Cohesion Metrics, Threshold

1. INTRODUCCIÓN

Las organizaciones requieren sistemas de software que satisfagan sus operaciones, lo que impulsa la adopción de nuevos paradigmas y tecnologías. El enfoque de microservicios se ha consolidado como una arquitectura atractiva que incrementa la productividad y el éxito de los productos de software (Alshuqayran et. Al., 2016). Empresas como Netflix, Amazon, The Guardian, Spotify y Twitter han migrado sus aplicaciones hacia este paradigma (Alshuqayran et. Al., 2016 y Francesco et al. 2017).

No obstante, al ser una tecnología reciente, los microservicios presentan retos, entre ellos la evaluación de la calidad mediante métricas, siendo la cohesión un atributo esencial (Alshuqayran et. Al., 2016 y Al-Debagy y Martinek, 2020). Según (Chidamber y Kemerer, 1994), una clase es cohesiva cuando sus métodos operan sobre el mismo conjunto de variables de instancia.

Aunque existen múltiples propuestas, no hay consenso sobre cómo medir la cohesión en microservicios. En Cojocaru et al., 2019 se plantea un conjunto mínimo de criterios de evaluación, considerando la cohesión como subatributo de mantenibilidad, modularidad y manejabilidad. Otros trabajos (Bogner, et al., 2017, Ulander, 2017, Perepletchikov et al., 2007 y Al-Debagy y Martinek, 2020) proponen métricas orientadas a objetos, como cohesión de datos y uso de la interfaz de servicio, cohesión total, cohesión promedio de servicios y operaciones, cohesión secuencial, cohesión estricta y flexible de implementación. En Vera-Rivera, et al., 2020 se introducen métricas adaptadas de AOO (Arquitectura orientada a Objetos): la Falta de cohesión (LC) y el Grado de falta de cohesión (Coh), que miden dependencias entre microservicios.

En síntesis, las investigaciones muestran diversas formas de evaluar la cohesión, lo que evidencia la necesidad de una metodología general para abordar este problema.

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este artículo para la revisión se basa en la propuesta de Sánchez-Martín et al., 2022, enriquecida con los aportes de diversos autores, entre ellos Botella & Sánchez-Meca, Card, Cooper et al. y Ellis. Esta metodología se ilustra en la Figura 1.

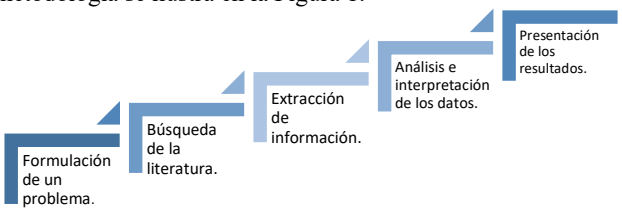


Figura 1. Metodología de la revisión sistemática según Sánchez-Martín et al., 2022.

2.1 Preguntas de investigación

Las preguntas de investigación que se determinaron fueron las siguientes:

Q1.- ¿Cuáles son las métricas de cohesión propuestas específicamente para arquitecturas de microservicios en la literatura reciente?

Q2.- ¿Qué investigaciones en el ámbito de microservicios incluyen una formalización rigurosa de las métricas de cohesión que utilizan o proponen?

Q3.- ¿Es posible definir umbrales uniformes para métricas de cohesión o deben adaptarse al contexto específico de cada sistema?

El objetivo de la revisión es analizar los trabajos publicados que abordan la medición de la cohesión en arquitecturas de microservicios. Para alcanzar este propósito y resolver las preguntas de investigación, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

2.2 Términos de búsqueda

Los terminos de busqueda que se utilizaron para encontrar los estudios relevantes fueron:

- Cohesion in microservices architecture
- Cohesion microservices.
- Cohesion metrics.
- Microservices architecture o Microservice architecture
- Quality metrics
- Microservice cohesion

2.3 Cadena de búsqueda

Para la localización de información relevante en torno al tema de cohesión en microservicios, se diseñó una cadena de búsqueda que permitiera recuperar publicaciones que incluyeran los términos más representativos del área de estudio, quedando la cadena de búsqueda formulada de la siguiente manera:

("Cohesion in microservices architecture" OR "Cohesion microservices" OR "Cohesion metrics" OR "Microservices architecture" OR "Microservice architecture" OR "Quality metrics" OR "Microservice cohesion")

2.4 Criterios de Inclusión/Exclusión

Con el propósito de centrar de manera efectiva el análisis de la literatura, se definieron criterios específicos para la selección de los estudios, los cuales se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios de Inclusión/Exclusión

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos publicados en los últimos 10 años dado el creciente uso de microservicios.	Artículos que mencionan la cohesión, pero sin proponer o aplicar métricas concretas.
Publicaciones y/o tesis que propusieran, adaptaran o aplicaran métricas de cohesión en el contexto de Microservicios.	Artículos que se encuentren incompletos.
Disponibilidad de acceso	Productos de patentes.
El idioma del documento es el inglés.	

2.5 Bases de datos Consultadas.

Se llevó a cabo una búsqueda en diversas bases de datos académicas, con el propósito de garantizar la recopilación de estudios pertinentes y actualizados sobre la medición de la cohesión en arquitecturas de microservicios. Estas fuentes fueron seleccionadas debido a su relevancia en el ámbito científico y a la calidad de las publicaciones que indexan. En la Tabla 2 se presentan las bases de datos consultadas junto con sus respectivos enlaces de acceso.

Tabla 2. Bases de datos consultadas.

Bases de datos académicas	Links de acceso
IEEE Xplore	https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp
Elsevier	https://www.elsevier.com/es-es
Google Académico	https://scholar.google.com/?hl=es
ResearchGate	https://www.researchgate.net/search

Se eligieron estas fuentes debido a su disponibilidad de investigaciones actualizadas y relevantes en el tema de cohesión en microservicios.

2.6 Proceso de Selección de Estudios

La selección de estudios se desarrolló en varias etapas: Inicialmente se recuperaron 18,000 artículos a partir de los términos de búsqueda y, tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión descritos anteriormente, se redujo el conjunto a 23 trabajos, los resultados se muestran en la Figura 2.

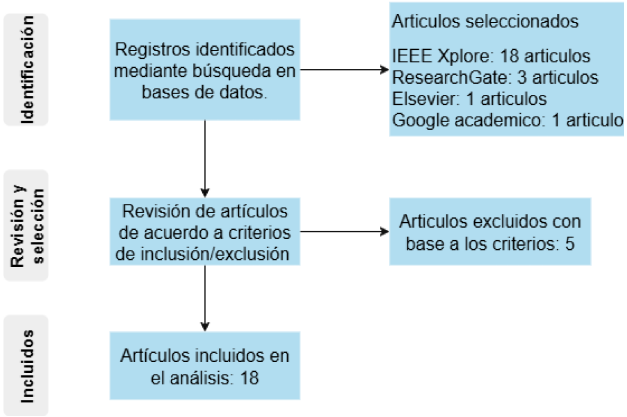


Figura 2. Diagrama de selección de artículos.

3. ANÁLISIS

Tras concluir el proceso de búsqueda y filtrado, se obtuvo un total de 23 artículos seleccionados para el análisis detallado. De este conjunto, 2 estudios (Chidamber y Kemerer, 1994 y Hitz y Montazeri, 1996) se centran en la cohesión dentro de la arquitectura orientada a objetos (AOO), mientras que 3 investigaciones (Mohammed et al., 2014, Zhang y Xinke, 2009, Shim et al., 2008) abordan la temática en el contexto de la arquitectura orientada a servicios (SOA). La mayoría, es

decir, 18 artículos (Al-Debagy y Martinek, 2020; Bogner et al., 2017; Bogner et al., 2017b; Candela et al., 2016; Carvalho et al., 2020; Cojocaru et al., 2019; Hasan et al., 2023; Jin et al., 2018; Juan, Olivia y Guadalupe, 2025; Li et al., 2019; Perepletchikov et al., 2007; Quattrocchi et al., 2024; Santos y Rito, 2020; Sellami y Saied, 2025; Ulander et al., 2017; Vera-Rivera, 2020; Vera Rivera, 2021; Wardhiana et al., 2024), se enfocan específicamente en la arquitectura de microservicios (MSA), lo que refleja el creciente interés y relevancia de este enfoque en la comunidad científica y en el desarrollo de software contemporáneo. En la Figura 3 se muestra la distribución porcentual de estos artículos según la arquitectura abordada.

Una vez identificados y categorizados los trabajos que constituyen el conjunto de análisis, se procede a la siguiente fase de la investigación, la cual consiste en analizar de forma rigurosa los contenidos para dar respuesta a las preguntas de investigación previamente establecidas. Estas preguntas buscan orientar el estudio hacia la comprensión de las métricas de cohesión más relevantes y su aplicación en el ámbito de los microservicios.

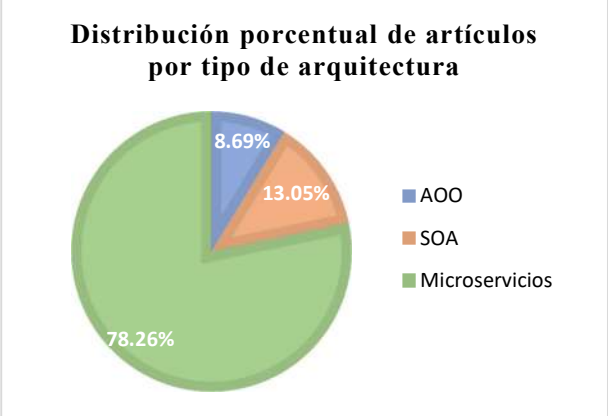


Figura 3. Gráfica de artículos seleccionados.

RQ1.- ¿Cuáles son las métricas de cohesión propuestas específicamente para arquitecturas de microservicios en la literatura reciente?

La Tabla 3 presenta un resumen organizado por autor y las métricas correspondientes. En ella se aprecia la diversidad de enfoques empleados para evaluar la cohesión, que abarca desde métricas clásicas como LCOM (Falta de cohesión en los métodos) y ALCOM (Promedio de LCOM), hasta propuestas orientadas al contexto de microservicios, tales como SIDC (Cohesión de la interfaz de datos), AvgCohS (Cohesión media de los servicios) o C(MSc) (Cohesión de un candidato a microservicio).

Este panorama evidencia que la investigación sobre cohesión en microservicios no se limita a una sola perspectiva, sino que abarca métricas que permiten analizar la cohesión en múltiples niveles: métodos y clases, interfaces, servicios y sistemas completos. Esta diversidad de enfoques resulta esencial para evaluar de manera integral la calidad estructural y funcional en el diseño e implementación de arquitecturas basadas en microservicios.

Tabla 3. Métricas de cohesión para microservicios.

Artículo	Métrica
Al-Debagy y Martinek, 2020; Wardhiana et al., 2024	Falta de cohesión en los métodos. **LCOM [1]**
	Promedio de LCOM. **ALCOM [2]**
Jin et al., 2018; Sellami y Saied, 2025	Cohesión a nivel de mensaje **CHM [3]**
	Cohesión a nivel de dominio. **CHD [4]**
Li et al., 2019	Cohesión relacional **RCi [5]**
Hasan et al., 2023	Normalización de cohesión entre clases. **NCAM [6]**
Juan, Olivia y Guadalupe, 2025	Cohesión **Cohesion [7]**
Bogner et al., 2017; Bogner et al., 2017b; Cojocaru et al., 2019; Perepletchikov et al., 2007;	Cohesión de la interfaz de datos. **SIDC [8]**
	Cohesión de uso de la interfaz. **SIUC [9]**
	Cohesión total de la interfaz de servicio. **TSIC [10]**
	Cohesión de uso secuencial del servicio. **SSUC [11]**
	Estricta cohesión en la implementación del servicio. **SSIC [12]**
	Poca cohesión en la implementación del servicio. **LSIC [13]**
	Implementación de la cohesión. **IMPC [14]**
Ulander et al., 2017	Cohesión media de los servicios. **AvgCohS [15]**
	Cohesión media de las operaciones. **AvgCoh()[16]**
Candela et al., 2016; Vera-Rivera, 2020; Vera Rivera, 2021;	Falta de cohesión entre microservicios. **LC [17]**
	Grado de cohesión. **Cohi [18]**

Tabla 3. Métricas de cohesión para microservicios (Continuación).

Artículo	Métrica
Candela et al., 2016; Vera-Rivera, 2020; Vera Rivera, 2021;	Cohesión de aplicación. **CohT [19]**
Santos y Rito, 2020	Cohesión de un cluster. **Cohesion (c) [20]**
	Cohesión de una descomposición **Cohesion(d) [21]**
Quattrocchi et al., 2024	Metrica de cohesión para microservicio. **Coh_m [22]**
	Cohesión total **Coh [23]**
Carvalho et al., 2020	Cohesión de un candidato a microservicio. **C(MSc) [24]**
	Cohesión total **Cohesion [25]**

RQ2.- ¿Qué investigaciones en el ámbito de microservicios incluyen una formalización rigurosa de las métricas de cohesión que utilizan o proponen?

A partir del análisis de las métricas de cohesión recopiladas en la revision (véase la Tabla 4), se observa una clara distinción entre aquellas que cuentan con una definición matemática y las que solo se describen de manera conceptual. En total, quince métricas ([6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [18], [19], [20], [21], [22] y [23]) aparecen marcadas con formalización rigurosa (✓).

En contraste, las métricas [1], [2], [5], [15] y [16] fueron identificadas sin una formalización clara (X). Además, se encuentran las métricas [3] y [4] en la categoría mixta (✓/X), lo que indica que Jin et al., 2018, la presenta con una formulación rigurosa, mientras que Sellami y Saied, 2025**,** sólo la menciona de manera conceptual.

En síntesis, los resultados de la revisión indican que la mayoría de los trabajos revisados no solo proponen métricas, sino que también las acompañan con un nivel de formalización que facilita su aplicación práctica, validación y comparación en diferentes contextos de investigación y desarrollo de software.

Tabla 4. Métricas de cohesión para microservicios.

Formalización	Métrica
X	LCOM **[1]**
	ALCOM **[2]**
	RCi **[5]**

Tabla 4. Métricas de cohesión para microservicios (Continuación).

Formalización	Métrica
X	AvgCohS **[15]**
	AvgCoh() **[16]**
	LC **[17]**
	C(MSc) **[24]**
✓/X	CHM **[3]**
	CHD **[4]**
✓	NCAM **[6]**
	Cohesion **[7]**
	SIDC **[8]**
	SIUC **[9]**
	TSIC **[10]**
	SSUC **[11]**
	SSIC **[12]**
	LSIC **[13]**
	IMPC **[14]**
	Cohi **[18]**
	CohT **[19]**
	Cohesion (c) **[20]**
	Cohesion(d) **[21]**
	Coh_m **[22]**
	Coh **[23]**

RQ3.- ¿Es posible definir umbrales uniformes para métricas de cohesión o deben adaptarse al contexto específico de cada sistema?

La Tabla 5 muestra los umbrales numéricos reportados en la literatura para distintas métricas de cohesión aplicadas en arquitecturas de microservicios. Se observa que algunos indicadores, como LCOM y ALCOM, presentan rangos relativamente definidos (por ejemplo, 0–0.8 o 0.17–0.33), mientras que otras métricas como CHM y CHD se sitúan en intervalos más acotados (0.6–0.7). Sin embargo, varias métricas –entre ellas NCAM, Cohesion, LC, C(MSc) y Cohi– carecen de valores umbral explícitos o se reportan con gran variabilidad, e incluso aparecen valores extremadamente bajos o singulares (por ejemplo, 3.85×10^{-8} en AvgCohS o 1.89×10^{-13} en AvgCoh()). Para visualizar esta diversidad, la Figura 4 resume la cantidad de métricas según el tipo de umbral identificado: valores estándar de 0–1, umbrales diversos o ausencia de umbral.

Este panorama evidencia que no existe un umbral universal que pueda aplicarse de manera uniforme a todas las métricas de cohesión. Las diferencias en los rangos y en la disponibilidad de valores de referencia dependen del tipo de métrica, de la arquitectura analizada y del enfoque de cada estudio. Por tanto, los umbrales deben adaptarse al contexto específico de cada sistema, considerando factores como el tamaño del microservicio, el lenguaje de programación, el dominio de aplicación y las prácticas de diseño utilizadas. Esta variabilidad respalda la conclusión de que la interpretación de las métricas de cohesión requiere un análisis contextual en lugar de la aplicación de valores fijos.

Tabla 5. Umbrales de métricas de cohesión para microservicios.

Umbral	Métrica
0-0.8 (Al-Debagy, O.)	**LCOM**
	ALCOM
0.17-0.33 (Wardhiana et al., 2024)	**LCOM**
	ALCOM
0.6-0.7 (Jin, W.) 0.538-1.168 (Sellami, K.)	**CHM**
0.6-0.7 (Jin, W.) 0.351-1.375 (Sellami, K.)	**CHD**
3.75-13.5	**RCi**
$3.85*10^{-8}$	**AvgCohS**
$1.89*10^{-13}$	**AvgCoh()**
1.5	**CohT**
X	**NCAM**
	Cohesion
	LC
	C(MSc)
	Cohi
0-1	**SIDC**
	SIUC
	TSIC
	SSUC
	SSIC
	LSIC
	IMPC
	Coh
	Coh_m
	Coh
	Cohesion (c)
	Cohesión(d)

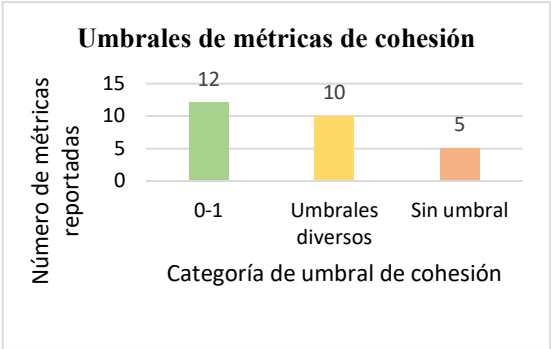


Figura 4. Distribución de métricas de cohesión según el tipo de umbral.

6. CONCLUSIONES

El análisis de la literatura evidencia que la cohesión es un atributo clave para garantizar la calidad en arquitecturas de microservicios, pero aún carece de una estandarización universal. Se identificó una amplia diversidad de métricas, desde adaptaciones de orientadas a objetos, como LCOM y ALCOM, hasta propuestas específicas para microservicios, como SIDC, C(MSc) y CohT, que permiten evaluar la cohesión en distintos niveles (método, clase, interfaz y servicio completo). Sin embargo, no todas cuentan con una formalización matemática rigurosa mientras algunas ofrecen definiciones precisas, otras se limitan a descripciones conceptuales.

Asimismo, los umbrales reportados varían significativamente entre estudios, lo que confirma que no es posible, hasta el momento, establecer valores uniformes. La medición de la cohesión debe, por tanto, adaptarse al contexto particular de cada sistema, considerando el dominio de aplicación, el lenguaje de programación, el tamaño de los microservicios y las prácticas de diseño empleadas.

En conjunto, estos hallazgos subrayan la necesidad de avanzar hacia una metodología general que integre criterios de formalización, rangos de referencia flexibles y un enfoque contextualizado, con el fin de facilitar la evaluación objetiva de la cohesión y fortalecer la calidad estructural de las aplicaciones basadas en microservicios.

REFERENCIAS

Al-Debagy, O. and Martinek, P. (2020) 'A Metrics Framework for Evaluating Microservices Architecture Designs', Journal of Web Engineering. https://doi.org/10.13052/jwe1540-9589.19341.

Alshuqayran, N., Ali, N. and Evans, R. (2016) 'A Systematic Mapping Study in Microservice Architecture', in 2016 IEEE 9th Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA), 4–6 November, Macau, China. IEEE. doi:10.1109/soca.2016.15.

Alsayed, A.S., Dam, H.K. and Nguyen, C. (2024) 'MicroRec: Leveraging Large Language Models for Microservice Recommendation', in MSR '24: 21st International

Conference on Mining Software Repositories. ACM. https://doi.org/10.1145/3643991.3644916.

Bogner, J., Wagner, S. and Zimmermann, A. (2017) 'Automatically measuring the maintainability of service- and microservice-based systems', in IWSM/Mensura '17: 27th International Workshop on Software Measurement and 12th International Conference on Software Process and Product Measurement. ACM. https://doi.org/10.1145/3143434.3143443.

Bogner, J., Wagner, S. and Zimmermann, A. (2017b) 'Towards a practical maintainability quality model for service-and microservice-based systems', in ECSA '17: 11th European Conference on Software Architecture. ACM. https://doi.org/10.1145/3129790.3129816.

Candela, I., Bavota, G., Russo, B. and Oliveto, R. (2016) 'Using Cohesion and Coupling for Software Remodularization', ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, 25(3), pp.1–28. doi:10.1145/2928268.

Carvalho, L., Garcia, A., Colanzi, T.E., Assuncao, W.K.G., Pereira, J.A., Fonseca, B., Ribeiro, M., de Lima, M.J. and Lucena, C. (2020) 'On the Performance and Adoption of Search-Based Microservice Identification with toMicroservices', in 2020 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME), 28 September–2 October, Adelaide, Australia. IEEE. doi:10.1109/icsme46990.2020.00060.

Chidamber, S.R. and Kemerer, C.F. (1994) 'A metrics suite for object oriented design', IEEE Transactions on Software Engineering, 20(6), pp.476–493. doi:10.1109/32.295895.

Cojocaru, M.-D., Uta, A. and Oprescu, A.-M. (2019) 'Attributes Assessing the Quality of Microservices Automatically Decomposed from Monolithic Applications', in 2019 18th International Symposium on Parallel and Distributed Computing (ISPDC). IEEE. https://doi.org/10.1109/ispdc.2019.00021.

Francesco, P.D., Malavolta, I. and Lago, P. (2017) 'Research on Architecting Microservices: Trends, Focus, and Potential for Industrial Adoption', in 2017 IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA), 3–7 April, Gothenburg, Sweden. IEEE. doi:10.1109/icsa.2017.24.

Hasan, M.H., Osman, M.H., Admodisastro, N.I. and Muhammad, M.S. (2023) 'From Monolith to Microservice: Measuring Architecture Maintainability', International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 14(5). doi:10.14569/ijacsa.2023.0140591.

Hitz, M. and Montazeri, B. (1996) 'Chidamber and Kemerer's metrics suite: a measurement theory perspective', IEEE Transactions on Software Engineering, 22(4), pp.267–271. doi:10.1109/32.491650.

Jin, W., Liu, T., Zheng, Q., Cui, D. and Cai, Y. (2018) 'Functionality-Oriented Microservice Extraction Based on Execution Trace Clustering', in 2018 IEEE International Conference on Web Services (ICWS). IEEE. https://doi.org/10.1109/icws.2018.00034.

Juan, C.R.-P., Olivia, G.F.-D. and Guadalupe, A.S.-G. (2025) 'Cohesion Metrics for Microservices', IEEE Access, 13, pp.128532–128540. doi:10.1109/access.2025.3589789.

Li, S., Zhang, H., Jia, Z., Li, Z., Zhang, C., Li, J., Gao, Q., Ge, J. and Shan, Z. (2019) 'A dataflow-driven approach to identifying microservices from monolithic applications', Journal of Systems and Software, 157, 110380. https://doi.org/10.1016/j.jss.2019.07.008.

Mohammed Elhag, A.A. and Mohamad, R. (2014) 'Metrics for evaluating the quality of service-oriented design', in 2014 8th Malaysian Software Engineering Conference (MySEC), 23–24 September, Langkawi, Malaysia. IEEE. doi:10.1109/mysec.2014.6986006.

Perepletchikov, M., Ryan, C. and Frampton, K. (2007) 'Cohesion Metrics for Predicting Maintainability of Service-Oriented Software', in Seventh International Conference on Quality Software (QSIC 2007). IEEE. https://doi.org/10.1109/qsic.2007.4385516.

Quattrocchi, G., Cocco, D., Staffa, S., Margara, A. and Cugola, G. (2024) 'Cromlech: Semi-Automated Monolith Decomposition Into Microservices', IEEE Transactions on Services Computing, pp.1–16. doi:10.1109/tsc.2024.3354457.

Sánchez-Martín, M., Navarro-Mateu, F. and Sánchez-Meca, J. (2022) 'Las Revisiones Sistemáticas y la Educación Basada en Evidencias', ESPIRAL. Cuadernos del Profesorado, 15(30), pp.108–120. doi:10.25115/ecp.v15i30.7860.

Santos, N. and Rito Silva, A. (2020) 'A Complexity Metric for Microservices Architecture Migration', in 2020 IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA), 16–20 March, Salvador, Brazil. IEEE. doi:10.1109/icsa47634.2020.00024.

Sellami, K. and Saied, M.A. (2025) 'Contrastive Learning-Enhanced Large Language Models for Monolith-to-Microservice Decomposition', arXiv (Cornell University). doi:10.48550/arxiv.2502.04604.

Shim, B., Choue, S., Kim, S. and Park, S. (2008) 'A Design Quality Model for Service-Oriented Architecture', in 2008 15th Asia-Pacific Software Engineering Conference, 3–5 December, Beijing, China. IEEE. doi:10.1109/apsec.2008.32.

Ulander, D. (2017) Software Architectural Metrics for the Scania Internet of Things Platform: From a Microservice Perspective. Thesis, Uppsala universitet, Datorteknik. http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-325592.

Vera Rivera, F. (2021) Modelo inteligente de especificación de la granularidad de aplicaciones basadas en microservicios. Universidad del Valle.

Vera-Rivera, F.H., Puerto-Cuadros, E.G., Astudillo, H. and Gaona-Cuevas, C.M. (2020) 'Microservices Backlog – A Model of Granularity Specification and Microservice Identification', Lecture Notes in Computer Science, pp.85–102. doi:10.1007/978-3-030-59592-0_6.

Wardhiana, I.N.G.A.M., Ghufron, M.Z., Jati, S.M., Septiyanto, A.F. and Sarno, R. (2024) 'Optimizing Microservices Architecture Using Multi-Criteria Decision Making (MCDM): A Case Study Of PayPal REST API', in 2024 11th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), pp.308–313. doi:10.1109/icitacee62763.2024.10762818.

Zhang, Q. and Xinke, L. (2009) 'Complexity Metrics for Service-Oriented Systems', in 2009 Second International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling (KAM 2009), 30 November–1 December, Wuhan. IEEE. doi:10.1109/kam.2009.90.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Graph Data Analysis Against Money Laundering

Lozano Lozano Francisco Cervando, Salas Núñez Andrés, Torres Hernández Luis Eduardo, García Castañón Alfredo, Márquez Martínez Luis Enrique

**Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Zacatecas, Zacatecas, 98000, México. (Tel:492-9245266 e-mail: m20450776@itz.edu.mx, andres.salas@itz.edu.mx, luis.torres@itz.edu.mx, alfredo.garcia@itz.edu.m, luise.mm@itz.edu.mx)*

Resumen: El lavado de activos consiste en el proceso mediante el cual se encubre el origen de los fondos generados mediante el ejercicio de algunas actividades ilícitas. Según el informe de actividades emitido en 2021, generado por la Unidad de Inteligencia Financiera (UIF), se recibieron de entidades financieras 172.329 reportes de operaciones inusuales de aquellas actividades, conductas y comportamientos que no coinciden con los antecedentes o actividades conocidas por los respectivos clientes que pudieran estar relacionados con el lavado de activos. Con base en esta problemática, surge la necesidad de desarrollar un sistema web, estructurado en dos microservicios, utilizando la base de datos orientada a grafos, que permita el almacenamiento de información a través de relaciones entre nodos, así como la implementación de algoritmos de centralidad, comunidad y cercanía para la clasificación de la información. El objetivo es desarrollar un sistema basado en web para que las entidades gubernamentales puedan identificar de manera eficiente este tipo de conductas, utilizando técnicas de análisis de datos de gran volumen del sistema financiero, facilitando la posibilidad de cruzar múltiples fuentes de información, a través de una base de datos orientada a grafos, que permite organizar la información en nodos interconectados, mejorando el análisis de cada individuo para realizar una completa investigación y seguimiento a sus operaciones, con base en topologías establecidas por la UIF, que sustentan la clasificación y descripción de los métodos utilizados por organizaciones criminales para generar una apariencia de legalidad a los fondos de origen ilícito.
Palabras clave: Blanqueo de capitales, modelos matemáticos, algoritmos, bases de datos.

1 INTRODUCCION

El Internet, los dispositivos móviles y la gran cantidad de datos digitales sirven como desarrollo de la ciencia, la tecnología y diversas áreas del conocimiento, lo cual incrementa de manera exponencial la cantidad de información que se genera de forma digital, propiciando el uso de recursos informáticos para ayuda a la sociedad en general, pero a la vez, permitiendo la inserción de un volumen considerable de recursos económicos y digitales de procedencia ilícita al sistema financiero, dando como consecuencia la formación de grandes entidades que generan cuantiosas cantidades de dinero, cuyo objetivo principal es darle apariencia de legalidad ante cualquier autoridad, este fenómeno es llamado lavado de dinero o blanqueo de capitales.

En consecuencia, el lavado de dinero representa un delito de carácter grave para el desarrollo de la economía del país. Por tal motivo es necesario realizar análisis profundos en el sector gubernamental para brindar un amplio panorama del desarrollo de este fenómeno, usando herramientas tecnológicas que ayuden a reducir este tipo de prácticas que afectan directamente en el desarrollo de la sociedad.

Por lo anterior y conforme al avance de la tecnología, el objetivo es desarrollar un sistema web a los entes gubernamentales para identificar de manera eficiente este tipo de conductas, utilizando técnicas de análisis de grandes volúmenes de datos, provenientes del sistema financiero, mediante el uso de estructuras de datos de almacenamiento en grafos. Facilitando la posibilidad de cruzar múltiples fuentes de información, a través de base de datos orientada a grafos, que permiten organizar la información en nodos conectados entre sí, mejorando el análisis de cada individuo para realizar una investigación y seguimiento completo de sus operaciones, en base a tipologías establecidas por la Unidad de Inteligencia Financiera (UIF), que apoyan a clasificar y describir los métodos utilizados por las organizaciones criminales para generar apariencia de legalidad a los fondos de procedencia ilícita.

1.1 Objetivo General

Crear un sistema web que permita almacenar, gestionar y visualizar información, a través de un modelo basado en las relaciones entre diferentes entidades, frente al lavado de dinero, aplicando técnicas y algoritmos de grafos.

1.2 Justificación

La presente investigación se enfoca en el desarrollo de un sistema web para el análisis de entidades relacionadas, a través del almacenamiento en grafos, ya que a partir de los vínculos que existen entre las relaciones, es posible detectar comunidades de entidades que estén involucradas en temas de lavado de activos. Los motivos que llevan a realizar este proyecto se centran en la propuesta de un modelo de análisis de datos a seguir por la Unidad de Inteligencia Patrimonial y Económica (UIPE) de los estados de la República Mexicana, en materia al combate de recursos de procedencia ilícita. Así mismo, poder contribuir al desarrollo de un mejor estado y país, ya que este tipo de actos afectan y reducen los ingresos tributarios

gubernamentales y por lo tanto, perjudican directa e indirectamente a la sociedad habiendo disminución en inversión y calidad de vida.

2 METODOLOGIA

La investigación de este trabajo se centra en el análisis de estructuras de datos altamente relacionadas, como transacciones bancarias entre personas físicas y morales para detectar patrones, personas centrales y comunidades de datos en el tema de lavado de activos.

La metodología de desarrollo implementada para la creación del sistema web es incremental como se muestra en la figura 1, parte de un conjunto de requerimientos básicos mejor conocidos como bosquejo de descripción, que conforme avanza el desarrollo se añaden versiones más completas del sistema validadas y probadas por el cliente, así hasta llegar a una versión final que satisface las necesidades del usuario y cumple con todos los requerimientos de información y administración (León, 2021).

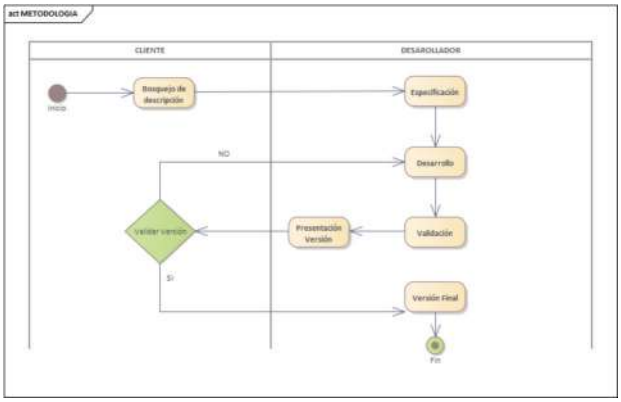


Figura 1 Diagrama de actividad metodología de desarrollo incremental, (fuente propia).

2.1 Descripción de las especificaciones del sistema

El sistema de acuerdo con su naturaleza de análisis de datos e información altamente relacionada contempla la implementación de una arquitectura orientada a microservicios, de manera que existan servicios independientes, proporcionando de manera autónoma funcionalidad al sistema central y estableciendo una comunicación entre los servicios a través de ApiRest, creando así una infraestructura flexible y adaptable frente a modificaciones posteriores. El marco de trabajo, las especificaciones del sistema incluyen una descripción, compuesta por:

•Requisitos del Sistema: Describe las necesidades del sistema, en base a la funcionalidad y los actores que forman parte de la gestión.

•Diseño Microservicio de configuración: microservicio de gestión de usuarios, catálogos y autentificación.

•Diseño Microservicio de lógica: microservicio de gestión de la base de datos de grafos Neo4j y núcleo central de procesamiento de información, con este se da solución a la problemática, gestiona la lógica de grafos y el análisis para mostrar al usuario datos procesados.

La arquitectura que se plantea para desarrollo del sistema web, consiste en dividir el sistema en dos microservicios, un Microservicio de Configuración y un Microservicio de Lógica. Como se observa en la figura 2, el microservicio de configuración se conecta a una base de datos MYSQL, encargado de gestionar las peticiones de almacenamiento y administración de catálogos, el microservicio de lógica analiza las relaciones entre nodos de acuerdo con la estructura definida en el microservicio de configuración, ambos servicios conectados a una misma interfaz gráfica.

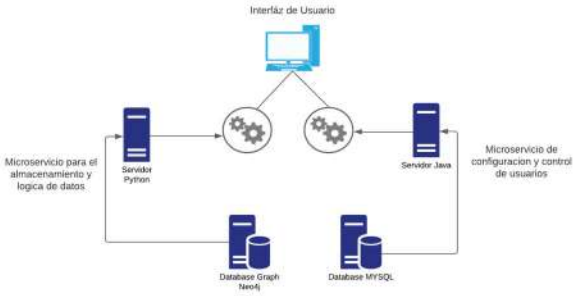


Figura 1. Arquitectura de microservicios. (fuente propia)

2.2 Requisitos del sistema

La metodología para la documentación e implementación del sistema Web utilizada es UML (Unified Modeling Language, Lenguaje Unificado Modelado), la cual es una herramienta para el desarrollo de software enfocado a objetos que representa de manera conceptual y física los sistemas de software (Bueno,2022).

2.3 Diseño de microservicios de configuracion

Como se muestra en la figura 3, el microservicio de configuración, representa la lógica de autentificación que se encarga de otorgar acceso y brindar seguridad a las peticiones HTTP (Hypertext Transfer Protocol, Protocolo de Transferencia de Hipertexto) que el cliente realiza (Mauro, 2015), además de definir la estructura de datos mediante catálogos, que mantienen una orden firme en la creación de nodos y propiedades, evitando información duplicada dentro de la estructura de la base de datos orientada a grafos.

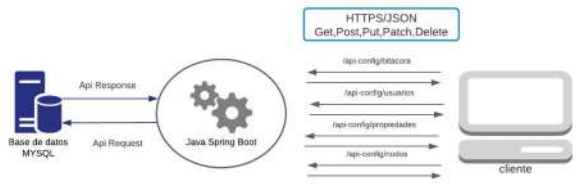


Figura 3 Diagrama de peticiones microservicio configuración, (fuente propia)

2.4 Diagrama de componentes

El diagrama de componentes se utiliza para desplegar información acerca de las relaciones entre los diferentes componentes que conforman el microservicio (Mesa, 2024), mediante una vista estática en la que se muestran componentes físicos y lógicos.

2.5 Diagrama de Componentes Microservicio Configuración

La figura 4, muestra la relación de conexión que existe entre los 3 componentes principales del sistema un servidor web, representa la capa de presentación encargada de la difusión gráfica de información para los usuarios finales, un servidor de configuración, representa la lógica de negocio, encargado del procesamiento de información y de la gestión de catálogos y un servidor de base de datos como gestor de almacenamiento para la persistencia de datos y arquitectura de los proyectos.

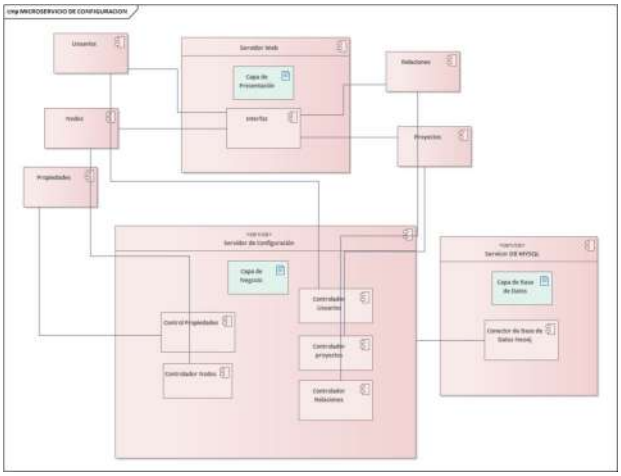


Figura 4 Diagrama de componentes microservicio configuración, (fuente propia)

2.6 API REST Microservicio de Configuración

La comunicación al servicio de configuración se realiza mediante el protocolo Http (Hypertext Transfer Protocol, Protocolo de Transferencia de Hipertexto), por medio de una Url (Uniform Resource Locator, Localizador Uniforme de Recursos), que responde a las peticiones en formato JSON (Lawi, 2021). El microservicio provee de cinco módulos principales que brindan seguridad y estructura a la información conformado por el módulo de usuarios, módulo de nodos, módulo de propiedades, módulo de relaciones y módulo de proyectos.

2.7 Gestión de Nodos

Las entidades nodos, propiedades y relaciones, comprenden el módulo principal del microservicio de configuración, que provee la estructura para organizar un modelo de nodos robusto y flexible, de tal manera que el sistema evolucione de acuerdo con los cambios y a las necesidades de la información. La gestión de nodos funciona de la siguiente forma como se observa en la figura 5, las entidades mencionadas se relacionan entre sí, para formar una estructura sólida que cumple los requisitos para modelar cualquier grafo, los nodos contienen relaciones y propiedades extendiendo la funcionalidad y herencia.

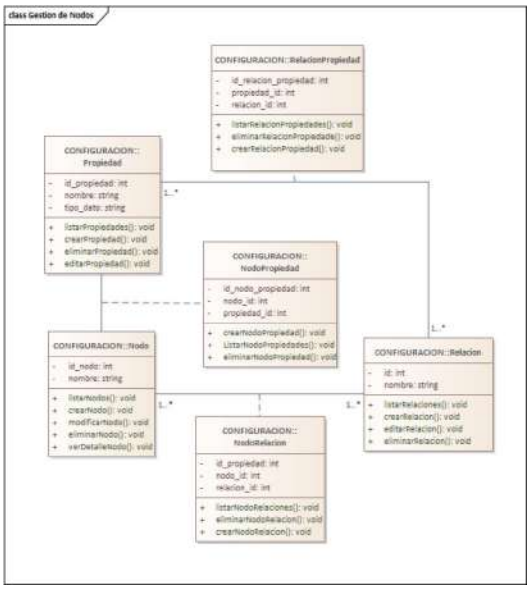


Figura 5 Diagrama de componentes microservicio configuración, (fuente propia)

2.8 API REST Microservicio de Configuración

La comunicación al servicio de configuración se realiza mediante el protocolo Http (Hypertext Transfer Protocol, Protocolo de Transferencia de Hipertexto), por medio de una Url (Uniform Resource Locator, Localizador Uniforme de Recursos), que responde a las peticiones en formato JSON (Lawi 2021). El microservicio provee de cinco módulos principales que brindan seguridad y estructura a la información conformado por el módulo de usuarios, módulo de nodos, módulo de propiedades, módulo de relaciones y módulo de proyectos.

2.9 Gestión de Nodos

Las entidades nodos, propiedades y relaciones, comprenden el módulo principal del microservicio de configuración, que provee la estructura para organizar un modelo de nodos robusto y flexible, de tal manera que el sistema evolucione de acuerdo con los cambios y a las necesidades de la información. La gestión de nodos funciona de la siguiente forma como se observa en la figura 6, las entidades mencionadas se relacionan entre sí, para formar una estructura sólida que cumple los requisitos

para modelar cualquier grafo, los nodos contienen relaciones y propiedades extendiendo la funcionalidad y herencia.

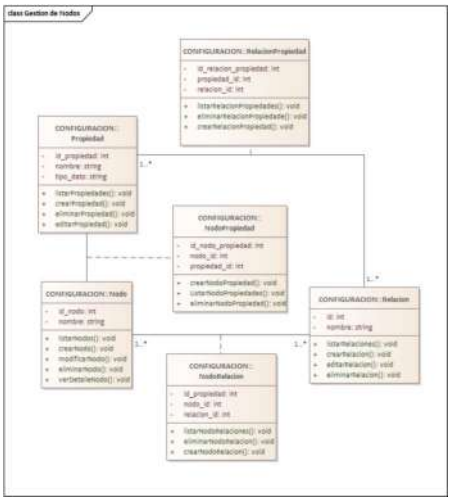


Figura 6 Diagrama relacional composición de nodo, (fuente propia)

2.10 Diagrama de Componentes

Como se observa en la figura 7, el microservicio de lógica está compuesto, por tres servidores distribuidos en tres capas diferentes un servidor web, encargado de la capa de presentación con el usuario final y proveedor de la interfaz gráfica, un servidor de lógica, encargado de la capa de negocio que procesa las entradas y salidas de información y un servidor de base de datos, encargado de la gestión, manipulación y persistencia de datos.

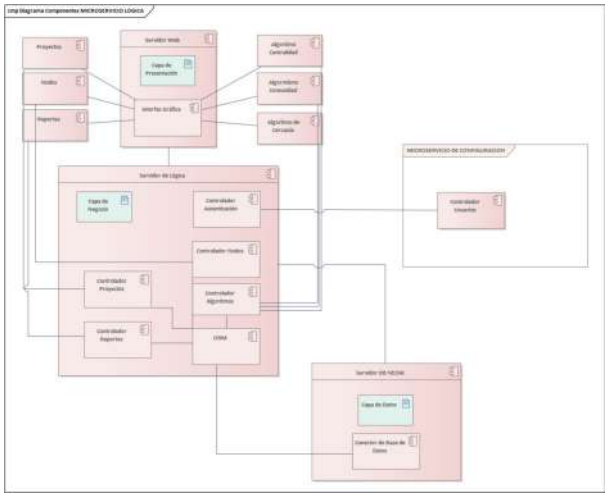


Figura 7 Diagrama de componentes microservicio de lógica, (fuente propia)

2.11 Diagrama de clases

El modelo de clases define la estructura de grafos que se utiliza para la creación de entidades como nodos, relaciones y propiedades, existe una entidad general llamada Nodo que contiene n cantidad de propiedades y relaciones que juntos conforman un grafo para trabajar con múltiples relaciones. La entidad Nodo gestiona las siguientes operaciones, crearNodo, eliminarNodo, modificarNodo como se muestra en la figura 8.

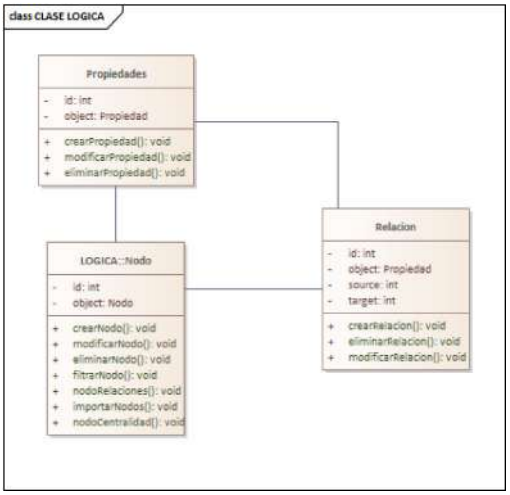


Figura 8 Diagrama de clases microservicio de lógica, (fuente propia)

Con la finalidad de ejemplificar la estructura y el comportamiento de relaciones y propiedades de los nodos, en la figura 9, se presenta un diagrama de las entidades como Nodos y Relaciones que existen entre estos, a manera de describir que existen en el grafo entidades de tipo Persona Física y Persona Moral, entre las cuales hay una relación de tipo TRANSFERENCIA que une estos nodos para formar una estructura de transferencias bancarias.

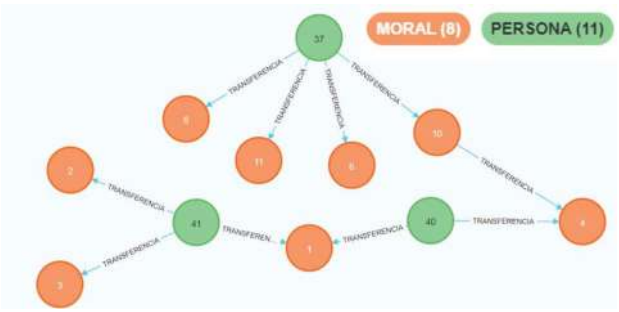


Figura 9 Esquema representativo de base de datos NoSQL Neo4j, fuente (propia)

2.12 Algoritmo de Centralidad

El algoritmo de centralidad (Díaz, 2022) se utiliza para determinar la importancia de distintos nodos en una red de vínculos y es proporcionado por Neo4j GDS (Graph Data Sience, Ciencia de Datos basada en grafos) biblioteca de ciencia de datos. La centralidad de grado mide el número de relaciones entrantes o salientes (o ambas) de un nodo, según la orientación de una proyección de relación, y se aplica a grafos ponderados o no ponderados, el algoritmo calcula la suma de todos los pesos positivos de las

relaciones adyacentes de un nodo, para cada nodo del gráfico.
El algoritmo de centralidad recibe dos parámetros de entrada, como primer parámetro el nombre del grafo, como segundo parámetro un objeto JSON de configuración, en el cual se indica los nodos que se van a analizar, las relaciones que unen estos nodos, las direcciones de las relaciones y los pesos que se quieran añadir para enriquecer el gráfico, retornando como resultado el id del nodo, así como la puntuación de centralidad de cada nodo en base a la configuración definida como se muestra en la figura 10.

```
CALL gds.degree.stream(
  graphName: String,
  configuration: Map
) YIELD
  nodeId: Integer,
  score: Float
```

Figura 10 Código Cypher algoritmo de centralidad, (fuente propia)

2.13 Algoritmo de Comunidad Louvain

El algoritmo de comunidad se utiliza para evaluar cómo se agrupan o dividen los grupos que conforman los conjuntos de nodos, así como la tendencia a fortalecerse o dividirse según sea el caso. El método Louvain es un algoritmo para detectar comunidades de nodos en grandes redes, de tal manera que maximiza una puntuación de modularidad para cada comunidad, esto significa evaluar que tan densamente conectados están los nodos dentro de cada comunidad, en comparación con que tan conectados estarían en una red aleatoria.

2.14 Algoritmo de Cercanía

El algoritmo de cercanía de proximidad sirve para detectar nodos dentro del grafo que puedan distribuir información de manera más eficiente. La cercanía de un nodo mide su distancia promedio a todos los demás nodos, los nodos con puntuación alta tienen las distancias más cortas a todos los demás nodos.

Por cada nodo u el algoritmo de cercanía de proximidad calcula la suma de sus distancias a todos los demás nodos, basándose en el cálculo de las rutas más cortas entre todos los pares de nodo, la suma restante se invierte para calcular la puntuación de cercanía para el nodo en concreto.

3. RESULTADOS

Las pruebas sobre el sistema de grafos se realizaron en evaluaciones periódicas por analistas de la unidad de trabajo que conocen el tema y realizan análisis en base a cualquier tipo de vínculo que se tenga entre diferentes elementos, los cuales fueron evaluando su funcionamiento y propiciando críticas constructivas del sistema, así como la evaluación del diseño de la aplicación donde se verifico que la estructura de componentes se adapta a un entorno actualizable y expandible para crecimiento de arquitectura en cambios futuros.

3.1 Caso de Estudio

El caso de estudio presenta información y datos de trabajo recabados de documentos físicos obtenidos a partir de tipología que apoya a la Unidad de Inteligencia Financiera (UIF), de manera aleatoria, es decir no tienen una estructura secuencial definida, sin embargo para mantener la privacidad de la información se presentan durante la investigación como “datos simulados”, de esta manera se categorizó en tablas con formato csv, mismos que buscan asegurar el proceso de análisis de personas físicas y morales, en base a redes de conexiones de transferencias bancarias que existan entre estas dentro de un periodo definido y validar la aplicación desarrollada, que contempla el análisis de información para la detección de lavado de activos.

3.2 Diseño del caso de estudio

Para definir el caso de estudio es importante identificar los objetivos específicos del caso en particular a estudiar, lo que permite brindar una alternativa para el análisis de vínculos de información, a través del almacenamiento en grafos, con el propósito de determinar la información con la que se va a trabajar y definir un plan donde se establezca el método o estrategia de recolocación de datos que contribuya a la evaluación para esta investigación, el sistema de gestión de grafos será evaluado en base a un conjunto de entidades simuladas del mundo real, donde se presentarán las entidades, propiedades y relaciones que formarán parte del almacenamiento de datos para la detección de comunidades, personas centrales y la cercanía que existe entre ellas.

3.3 Visualización del proyecto

En este contexto los datos cargados se visualizan en formato de grafo a través de una representación gráfica 3D, donde el usuario analista navega a través de los diferentes caminos y la estructura de grafos que se representa en la figura 11, de manera que se puede ver el flujo y dirección de las diferentes transferencias realizadas.

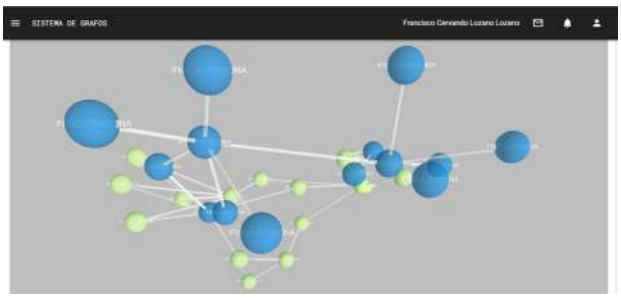


Figura 11 Visualización proyecto 3D, (fuente propia)

La visualización del grafo es un elemento importante para ver la manera en que se comportan las relaciones y los nodos a su vez, además de resaltar aquellas entidades con más peso dentro de sus relaciones.
Dentro de la información que se analiza en este caso de estudio, se aplican los algoritmos de centralidad, comunidad y cercanía, los cuales arrojan los siguientes resultados como se muestra en la figura 12.

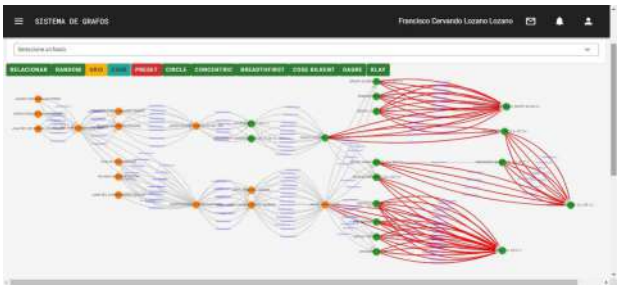


Figura 12 Análisis de resultados, (fuente propia)

3.4 Análisis General

El método para la recolección de información en el caso de estudio planteado, son las herramientas o instrumentos para obtener datos, entre las que se encuentran las entrevistas, análisis de documentos, encuestas y experimentos. En esta investigación se selecciona la encuesta, la cual consta de 3 secciones: (1) Análisis de datos, (2) Interfaz, (3) Rendimiento, mismas que cubren las necesidades de la investigación. En este contexto para medir y evaluar la encuesta, se hace uso de un procedimiento de medición en base a escalas para medir variables y atributos, de acuerdo con (Coronado 2007), se distinguen cuatro escalas o niveles de medición: nominal, ordinal, intervalos y escalas de proporción, las dos primeras (nominal y ordinal) se conocen como escalas categóricas y las escalas de (intervalo y proporción) como escalas numéricas. Para esta investigación se utilizan dos, (1) la escala ordinal que establece un orden de preferencia y una escala de Likert que de suma actitude o posturas y (2) escala de intervalos, donde se establece orden entre los valores para medir la distancia que existe entre cada valor. Una vez que se definieron las escalas de la investigación, las preguntas que se diseñaron son de opción múltiple donde se usan opciones de respuesta y se solicita seleccionar una alternativa dada. La encuesta se aplicó a 6 personas procedentes del área financiera, área jurídica y área de análisis, utilizando el caso de estudio seleccionado en la sección 3.1 en el sistema de grafos, con los resultados de la encuesta se analizaron los datos de forma cuantitativa. La herramienta de recolección de datos utilizada fue Google Forms que permite fácilmente crear y publicar formularios en tiempo y forma. De acuerdo con los resultados obtenidos de la encuesta de viabilidad, a continuación, se presenta una tabla comparativa general de evaluación del sistema. Donde se evalúan dos aspectos importantes, el proceso manual y el proceso automatizado de análisis de información. El objetivo de la tabla comparativa es demostrar el desempeño del sistema en proceso de gestión de información a través de grafos y la viabilidad del uso de los algoritmos presentados como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1 Comparativa sistema (fuente propia)

Característica Analizada	Descripción	Sistema De Grafos	Proceso De Análisis Manual
Tiempo De Recolección De Información	Tiempo de definición de estructura de datos y almacenamiento.	10 MIN -60 MIN	5 DÍAS
Número De Actividades	Número de actividades para completar un análisis de personas	1-9 ACTIVIDADES	18 ACTIVIDADES
Número De Algoritmos Por Análisis	Numero de algoritmos con los que cuenta para analizar y procesar información.	3 ALGORITMOS	1 ALGORITMO
Recursos Humanos	Número de personas, para generar un análisis	1 PERSONA	5 PERSONAS
Tiempo De Respuesta	Tiempo de respuesta en arrojar resultados de análisis de algoritmos	1-5 segundos	2 DÍAS
Organización De Información	Establece una estructura definida para almacenar y modelar información	SI	NO
Gestión De Proyectos	Permite la automatización de múltiples proyectos en diferentes hilos de análisis.	SI	NO
Gestión de reportes en tiempo y forma	Integración de reportes con forme a información actualizada en tiempo real.	SI	NO

Considerando que el sistema permite la organización y gestión de información de proyectos a través de una arquitectura definida por el usuario administrador, la dificultad del proceso sin duda genera los mejores rendimientos del sistema, que en comparación con la forma manual, se tienen que hacer actividades muy técnicas y variadas para llegar a un resultado concreto con un 100 % de dificultad; añadiendo a esto la generación de reportes en tiempo y forma por parte del sistema, de manera que se integren como evidencia dentro de una carpeta de investigación, conforme incrementa el volumen de información.

3.5 Trabajo a futuro

Como trabajos futuros de este proyecto se identifican los siguientes:

•Realizar mejoras en la configuración de catálogos, calificando cada atributo por el tipo de propiedad al que pertenece.
•Integrar un componente que se adapte al objeto que se desea importar, contemplando los siguientes medios a través de JSON, API, Base de datos relacional.

•Integrar un módulo de exportación de información para compartir datos con sistemas relacionados con el análisis de datos.

4. CONCLUSIONES

Una vez desarrollado el sistema, se demostró la funcionalidad en base a un caso de estudio simulado, los resultados obtenidos arrojan que la aplicación cumple de manera satisfactoria, es decir, con base al análisis de entidades y la aplicación de algoritmos se detectan las comunidades de datos existentes, la centralidad de las entidades analizadas y la cercanía que existe entre estas, minimizando el tiempo de respuesta.

En este contexto se logró implementar satisfactoriamente un sistema web de análisis a personas físicas y morales como entidades, mediante una arquitectura orientada a microservicios que permite adaptabilidad y crecimiento en expansiones futuras, haciendo uso de las estructuras de grafos para almacenar y procesar las entidades y relaciones definidas, como se muestra en la figura 13.

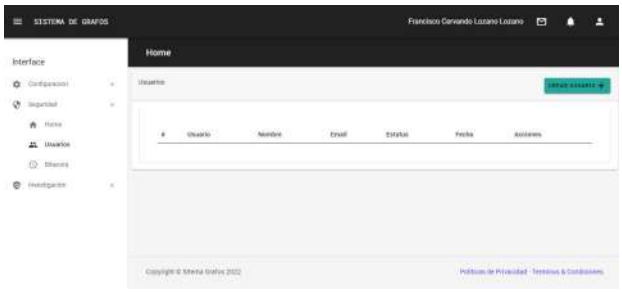


Figura 13 Análisis de resultados, (fuente propia)

Por lo tanto, la adopción de la arquitectura a través de estructuras de grafos reflejada en este sistema permite y facilita coadyuvar en investigaciones gubernamentales para la detección y búsqueda de delitos.

REFERENCIAS

Bueno L. I. L., (2022) Un lenguaje de modelo de objetos, Dialnet, vol. 7, nº 1, pp. 25-29.

Coronado Padilla J, «Escalas de medición,» Una Revista Disciplinar de Investigacion , vol. 2, nº 2, pp. 104-125, 2007.

Díaz M.A. and Grass B. D. (2022), A new framework for centrality on multilayer networks, Revista Cubana de Ciencias Informáticas.

Lawi A., Panggabean L.E. and Yoshida T. (2021), Evaluating GraphQL and REST API services performance in a massive and intensive accessible information system, Computers MDPI

León Y.A. (2021) Aplicación de la metodología incremental en el desarrollo de sistemas de información, Revista Universidad y Sociedad, vol. 13, nº 5, pp. 175-182.

Mauro T. (2015), Adopting Microservices at Netflix: Lessons for Architectural Design, Ngnix, https://www.nginx.com/blog/microservices-at-netflix-architectural-best-practices/

Meza R.A. (2024), Formal thinking, a determining factor in the teaching of class design under uml in programming, revistas.milpaalta.tecnm.mx, Vol 7, Num 2

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Comparative study of natural language processing algorithms for topic analysis in identifying issues faced by higher education students based on unstructured texts

Xavier De Jesús López-Velasco*, Isaac Machorro-Cano*, Lisbeth Rodríguez-Mazahua, Araceli Olmos-Vallejo**, Fabricio González-Soriano*, Monica Guadalupe Segura-Ozuna***

*Universidad del Papaloapan, Circuito Central #200, Colonia Parque Industrial, San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, México (e-mail: lopez.velasco.xavier@gmail.com, imachorro@unpa.edu.mx, fgonzalez@unpa.edu.mx, msegura@unpa.edu.mx).

**Tecnológico Nacional de México/I.T. Orizaba, Av. Oriente 9, 852. Col. Emiliano Zapata, Orizaba, Veracruz, México (e-mail: lrodriguezm@ito-depi.edu.mx, d15011207@orizaba.tecnm.mx)

Abstract: Currently, analyzing responses to open-ended questions in surveys poses a challenge for traditional statistical methods due to the high volume of unstructured data and the difficulty of identifying patterns efficiently. Given this problem, natural language processing (NLP) techniques represent an alternative for extracting valuable information and facilitating the interpretation of textual data. Therefore, this study evaluated three NLP algorithms: Latent Dirichlet Allocation (LDA), Structural Topic Model (STM), and Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT), applied to the analysis of open-ended responses obtained in a survey. Their performance was compared using the UMass coherence metric and execution time. The results showed that LDA stood out as the most efficient method, achieving greater thematic coherence and shorter processing time, consolidating itself as the most suitable option for this type of analysis.

Keywords: Topic analysis, BERT, higher education students, LDA, issues, natural language processing, STM, unstructured texts.

1. INTRODUCTION

La inteligencia artificial (IA) es una de las herramientas más revolucionarias de los últimos años, transformando la manera en que las personas interactúan con la tecnología y su entorno. Dentro de sus áreas de desarrollo, el NLP se posiciona como eje central para el manejo de datos textuales, además facilita la interacción entre humanos y máquinas mediante el uso del lenguaje natural (Hernández-Orallo *et al.,* 2022). En particular, el NLP orientado a la extracción de información resulta clave para identificar conceptos y relaciones en textos no estructurados, como las respuestas a preguntas abiertas de una encuesta, donde los métodos estadísticos tradicionales presentan limitaciones importantes (Bazzan et al., 2023).

En este sentido, se aplicó una encuesta en la Universidad del Papaloapan (Conformada por dos campus: Tuxtepec y Loma Bonita) para identificar la riqueza lingüística institucional debido a que la institución se ubica en una zona en donde existe una gran diversidad lingüística (Región de la Cuenca del Papaloapan en el estado de Oaxaca), dicha encuesta incluye dos preguntas abiertas que permiten a los estudiantes describir su relación con las lenguas indígenas y las problemáticas que enfrentan durante su formación académica. Sin embargo, para el análisis de dichas respuestas al utilizar métodos estadísticos tradicionales se requiere un procesamiento manual extenso, lo que limita la rapidez, eficiencia y profundidad del estudio. Ante esta situación, el NLP y en particular la extracción de información, se presentan como alternativas idóneas para facilitar la interpretación de las respuestas a preguntas abiertas, identificar conceptos y descubrir patrones semánticos que resultan difíciles de captar mediante técnicas convencionales.

Para aprovechar las ventajas del NLP en el análisis de respuestas a preguntas abiertas, se realizó un estudio comparativo con tres algoritmos: LDA, método clásico de modelado de tópicos aplicado en encuestas (Nawaz et al., 2022); STM, que incorpora covariables en el modelado de temas y ha sido usado en análisis de diferentes contextos (Bardutz & Bigazzi, 2022); y BERT, modelo basado en transformadores con alta capacidad para extraer información contextual (Srebrovic & Yonamine, 2020). Los tres se aplicaron a dos preguntas abiertas de la encuesta, calculando la coherencia y el tiempo de ejecución para determinar el método más adecuado para identificar las problemáticas de los estudiantes universitarios.

La estructura del artículo es la siguiente: en la sección 2 se presentan los trabajos relacionados con la aplicación de técnicas de NLP para el análisis de respuestas a preguntas abiertas. En la sección 3 se describe la metodología empleada que se conformó de cuatro etapas: análisis, selección, implementación y validación. Posteriormente, en la sección 4 se presenta un análisis comparativo de los tres algoritmos seleccionados, así como los resultados de la implementación de LDA para el análisis de temas en la identificación de problemáticas de estudiantes de nivel superior. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones y el trabajo a futuro.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

El análisis de respuestas a preguntas abiertas en encuestas mediante técnicas de NLP se consolida como una alternativa eficaz frente a los métodos estadísticos tradicionales, al permitir identificar patrones y temáticas relevantes en grandes volúmenes de texto. A continuación, se presenta una revisión de los trabajos más relevantes que aplicaron técnicas de NLP al análisis de respuestas a preguntas abiertas en encuestas.

Grönberg et al. (2021) desarrollaron Palaute, una herramienta en R que combina LDA, STM y análisis léxico de sentimientos, mostrando cómo estas técnicas facilitan la identificación de temas recurrentes en la vida estudiantil. Por otra parte, Bardutz y Bigazzi (2022) emplearon STM para organizar más de mil comentarios abiertos sobre seguridad y comodidad peatonal, descubriendo seis tópicos principales que aportaron información complementaria a los datos. En el ámbito educativo, Candela Rojas & Cañari Huerta (2022) evaluaron distintos algoritmos, entre ellos LDA, STM y Modelo de temas bitermino (BTM), para categorizar automáticamente más de 80 mil observaciones abiertas relacionadas con la entrega de tabletas educativas. Por su parte, Nawaz et al. (2022) emplearon LDA para el modelado de tópicos en respuestas abiertas de la *National Student Survey* en el Reino Unido, identificando categorías clave en la vida estudiantil que sirvieron de base para implementar mejoras educativas. Posteriormente, Inoue et al. (2023) aplicaron LDA para explorar las respuestas abiertas de investigadores de enfermería sobre los efectos negativos de la pandemia, identificando ocho tópicos en investigadores académicos y tres en clínicos. De igual manera, Pietsch y Lessmann (2018) evaluaron el uso de modelado de tópicos para analizar más de 7,700 respuestas abiertas en encuestas de mercado. Compararon LDA, BTM y *Word Network Topic Model* (WNTM) mostrando que los modelos diseñados para texto corto (BTM y WNTM) superaron a LDA en coherencia y representación temática, lo que evidencia la ventaja de estos enfoques en encuestas con respuestas breves. Así mismo, Torrao et al. (2024) analizaron respuestas abiertas de una encuesta de movilidad en la India aplicando BERT y RoBERTa para el análisis de sentimientos. Los modelos permitieron identificar emociones como ira, tristeza, alegría y optimismo en los testimonios de mujeres sobre su percepción de seguridad durante los desplazamientos. Por otra parte, Hahn et al. (2024) aplicaron tanto STM y BERT en más de 3,100 respuestas abiertas en encuestas de evaluación docente, logrando identificar desde temas generales como la calidad de las explicaciones hasta patrones específicos como el uso de recursos visuales o el humor del profesor. Además, Alshaikh et al. (2024) aplicaron modelos basados en BERT para el análisis de respuestas abiertas en instituciones educativas árabes. En su estudio *evaluaron Fast – Local Context Focus – Aspect Term Extraction and Polarity Classification* (FAST-LCF-ATEPC), AraBERT, MARBERT y QARiB, mostrando que FAST-LCF-ATEPC obtuvo el mejor desempeño en extracción de información, mientras que AraBERT logró mayor cobertura, aunque con aspectos menos relevantes, pero en conjunto confirmaron la utilidad de estas variantes de BERT. Por otra parte, Zucco et al. (2021) aplicaron el algoritmo léxico *Valence Aware Dictionary and sEntiment Reasoner* (VADER), adaptado al italiano con Sentix y MultiWordNet, para analizar respuestas abiertas de pacientes con fibrosis quística en programas de telemedicina. El estudio permitió calcular la polaridad de las opiniones (positiva o negativa) y relacionarla estadísticamente con la adherencia al tratamiento, mostrando cómo los enfoques léxicos también aportan valor en el análisis de encuestas con preguntas abiertas. En el ámbito medioambiental, Tvinnereim et al. (2017) aplicaron tanto LDA como STM en encuestas ciudadanas sobre el cambio climático, lo que permitió identificar temas latentes en las soluciones propuestas y relacionar su prevalencia con variables sociodemográficas. Van Buchem et al. (2022) desarrollaron el sistema *artificial intelligence patient reported experience measure* (AI-PREM) para analizar experiencias de pacientes mediante preguntas abiertas, empleando un modelo multilingüe basado en BERT para análisis de sentimientos y para el modelado de tópicos, alcanzando una alta coincidencia con la categorización manual realizada por expertos Además, González Canché (2023) presentó Machine driven classification of open-ended responses (MDCOR), un *framework* que integra NLP y el modelado de tópicos, usando el algoritmo LDA para clasificar respuestas en encuestas y redes sociales. En el ámbito de la salud pública, Smoll et al. (2021) utilizaron LDA para explorar más de 700 respuestas sobre la aplicación COVIDSafe, identificando barreras como la desconfianza gubernamental. También, Jayaratne y Jayatilleke (2020) mostraron que, en recursos humanos, la combinación de term frequency-inverse document frequency (TF-IDF) y LDA permite inferir rasgos de personalidad a partir de respuestas en entrevistas estructuradas, superando correlaciones obtenidas en redes sociales. Un análisis comparativo de los trabajos revisados mostró que, para el estudio de respuestas a preguntas abiertas en encuestas, se emplearon diversos algoritmos de NLP, tales como LDA, STM, BERT, BTM, RoBERTa, WNTM, FAST-LCF-ATEPC, AraBERT, MARBERT, QARiB y VADER. En conjunto, estos trabajos muestran cómo el NLP es un área capaz de adaptarse a distintos contextos en el análisis de grandes volúmenes de datos para el análisis de textos no estructurados.

3. METODOLOGÍA

La metodología adoptada en este estudio se centra en el análisis de respuestas a preguntas abiertas mediante técnicas NLP, con el propósito de evaluar y comparar algoritmos que permiten la extracción de información y el modelado de temas en datos textuales. Para estructurar el proceso, se definieron cuatro etapas: análisis, selección, implementación y validación como se observa en la Fig. 1.

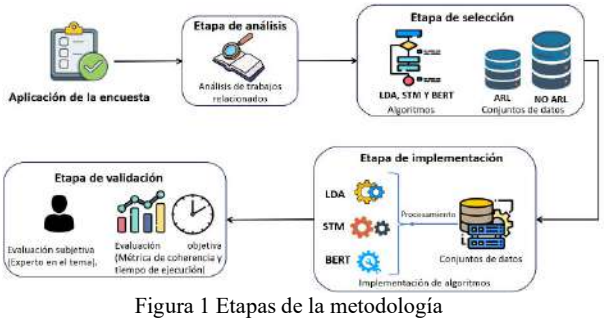


Figura 1 Etapas de la metodología

3.1 Etapa de análisis

En la primera etapa se llevó a cabo una revisión del estado del arte con el objetivo de identificar los algoritmos de NLP más empleados en el análisis de texto libre en encuestas. En total se analizaron 30 artículos, cuyos resultados se presentan en la Tabla 1, en donde se observa que los algoritmos más utilizados fueron LDA con 13 apariciones, STM con seis y BERT con cinco, seguidos por otros enfoques como BTM con tres, RoBERTa y WNTM con dos. El resto de los algoritmos mencionados (FAST-LCF-ATEPC, AraBERT, MARBERT, QARiB y VADER) tuvieron una sola aparición.

Tabla 1. Análisis de algoritmos de NLP

Algoritmo	Cantidad
LDA	13
STM	6
BERT	5
BTM	3
RoBERTa	2
WNTM	
FAST-LCF-ATEPC	1
AraBERT	
MARBERT	
QARIB	
VADER	

De este análisis se concluye que, si bien existe una variedad de técnicas aplicadas al modelado de tópicos y al análisis semántico de respuestas abiertas, los algoritmos más utilizados en la literatura siguen siendo LDA, STM y BERT, debido a su efectividad en la identificación de patrones temáticos y en la organización de grandes volúmenes de datos textuales.

3.2 Etapa de selección

En esta etapa se seleccionaron los algoritmos de NLP a emplear con los conjuntos de datos a evaluar. Se seleccionaron los algoritmos: LDA, STM y BERT por ser los más utilizados en la literatura y por su capacidad para abordar el modelado de tópicos y la extracción de información en respuestas abiertas. El *corpus* estuvo conformado por las dos preguntas abiertas de la encuesta teniendo un total de 1310 respuestas, que fueron sometidas a un preprocesamiento textual que incluyó la limpieza de los datos (palabras vacías, mal escritas o inexistentes), garantizando así la calidad de las respuestas.
Posteriormente, se organizaron en dos conjuntos de datos: el primer conjunto de datos fue de alumnos relacionados con alguna lengua indígena (ARL) que incluye a los estudiantes que declararon tener alguna relación con una lengua originaria (hablan o entienden) de los cuales se obtuvieron 202 respuestas. El segundo conjunto de datos estuvo conformado por alumnos no relacionados con alguna lengua indígena (NO ARL), que corresponde a quienes indicaron no tener vínculo con alguna lengua y de los cuales se obtuvieron 1108 respuestas. Esta división permitió comparar los resultados del análisis temático considerando el contexto sociolingüístico de los estudiantes.

3.3 Etapa de implementación

Durante la implementación, los algoritmos seleccionados se desarrollaron con distintas herramientas: LDA (Blei et al., 2003) mediante MALLET (McCallum, 2002), ampliamente usada en modelado de tópicos; STM en R (Roberts et al., 2019), por su capacidad de incorporar información contextual; y BERT en Python (Devlin et al., 2019), por su habilidad para captar relaciones semánticas. En todos los casos se emplearon los conjuntos de datos ARL y NO ARL, correspondientes a las respuestas estudiantiles. Para asegurar la comparabilidad, la calidad de los tópicos se evaluó con la métrica de coherencia UMass, mostrada en la ecuación (1), que mide la coherencia semántica entre las palabras más representativas de un tema. Aunque los valores suelen ser negativos, los más altos (menos negativos) indican mayor coherencia (Röder, Both & Hinneburg, 2015).

$$C_{UMass} = \frac{2}{N \cdot (N-1)} \sum_{i=2}^{N} \sum_{j=1}^{i-1} \log\left(\frac{P(w_i, w_j) + \varepsilon}{P(w_j)}\right) \quad (1)$$

Dónde:

- N = número de *top words* (palabras más representativas de cada tema).
- w_i,w_j: palabras del tópico.
- $P(w_i,w_j)$ = frecuencia relativa de que dos términos aparezcan juntos en el mismo documento.
- $P(w_j)$ = frecuencia relativa de un término individual en el corpus.
- ϵ = constante para estabilidad numérica (ϵ=1).

Implementación del algoritmo LDA

En este estudio se realizaron pruebas con MALLET para ambos conjuntos de datos, destacando por su flexibilidad al configurar el número de tópicos, los parámetros α y β y las iteraciones. La herramienta permitió incorporar *stopwords* (palabras vacías), es decir, palabras que no aportan un significado relevante (como “el”, “la”, “de”, entre otras) para mejorar la coherencia de los resultados. Dado que MALLET está basado en Java, se desarrolló una interfaz gráfica que facilita su uso y la carga de listas de *stopwords*, tanto predeterminadas como personalizadas. Estas listas se ajustaron en distintas pruebas, lo que mejoró la coherencia de los tópicos generados

Implementación del algoritmo STM

Para la implementación de STM se utilizó el lenguaje R en el entorno Visual Studio Code (Visual Studio Code, 2021). Se instalaron los paquetes *stm*, *tm*, *SnowballC* y *readr*, necesarios para el procesamiento de texto y la ejecución del modelo. El flujo de trabajo consistió en cargar los datos, limpiar el corpus (minúsculas, eliminación de puntuación, números y *stopwords* predeterminadas y personalizadas) y definir el número de temas a entrenar. Posteriormente, se ejecutó el modelo STM y se obtuvieron las palabras clave por tema. La calidad de los tópicos se evaluó con la métrica de coherencia UMass, cuyos resultados fueron exportados en un archivo en formato .CSV. STM permitió procesar y analizar respuestas abiertas de

manera eficiente, proporcionando las palabras más relevantes de cada tópico, así como una métrica objetiva para evaluar su coherencia y calidad.

Implementación del algoritmo BERT

Para la implementación del algoritmo BERT se utilizó Python en el entorno VSCode, junto con las bibliotecas *pandas* para la gestión de datos, *nltk* para el procesamiento de lenguaje, *scikit-learn* para tareas de aprendizaje automático y *bertopic* y *sentence-transformers* para el modelado de tópicos (Visual Studio Code, 2021). Se gestionaron *stopwords* en español mediante listas predeterminadas de *nltk* y una lista personalizada ajustada en distintas pruebas. El flujo de trabajo incluyó la limpieza del texto, la eliminación de puntuación y palabras vacías, y la generación de *embeddings* con el modelo multilingüe *paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2*, que permitió capturar relaciones semánticas entre las respuestas. BERTopic se combinó con *k-means* para agrupar los temas y extraer las palabras más representativas, utilizadas para asignar etiquetas interpretativas. La calidad de los tópicos se evaluó mediante la métrica de coherencia UMass. La implementación de BERT permitió organizar y comprender de manera más profunda las respuestas de la encuesta, aunque cabe destacar que presentó una limitación cuando se intentó realizar pruebas con un número de temas mayor a seis, además de presentar resultados de coherencia elevados.

3.4 Etapa de validación

En esta etapa se contó con la colaboración de un experto en lenguas indígenas y con una amplia experiencia en la docencia a nivel superior dentro de la Universidad del Papaloapan (UNPA), cuya participación fue fundamental para la interpretación de los resultados generados. Gracias a su conocimiento especializado, fue posible verificar la pertinencia cultural y lingüística de los temas obtenidos, así como identificar las principales problemáticas que enfrentan los estudiantes de nivel superior. De esta manera, la evaluación subjetiva del experto aportó un enfoque integral que complementó la evaluación objetiva de los indicadores cuantitativos de coherencia con una perspectiva más significativa.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los experimentos se obtuvieron utilizando una laptop Acer Nitro ANV15-51, equipada con un procesador Intel® Core™ i7-13620H de 13ª generación (2.40 GHz), 16 GB de memoria RAM DDR4, almacenamiento de 512 GB y una tarjeta gráfica dedicada de 6 GB. El sistema operativo empleado fue Windows 11 Home de 64 bits. Bajo este entorno de hardware y software se llevaron a cabo las pruebas con los algoritmos LDA, STM y BERT, registrando tanto los valores de coherencia como los tiempos de ejecución para los conjuntos de datos ARL y NO ARL.

La Tabla 2 presenta los resultados de coherencia promedio y tiempo de ejecución obtenidos con los tres algoritmos evaluados (LDA, STM y BERT) para el conjunto de datos ARL.

Tabla 2 Comparación de algoritmos *corpus* ARL

Algoritmo	Número de temas	Promedio coherencia	Promedio de tiempo
LDA	3	**-1.573**	**0.5417**
	5	-1.3582	**0.582**
	6	-1.2868	**0.5242**
	8	**-1.2021**	**0.444**
	10	**-1.1283**	**0.438**
STM	3	-1.8176	3.367
	5	-1.5320	3.18
	6	-1.406	2.61
	8	-1.2573	2.86
	10	-1.1425	2.79
BERT	3	-1.74	15.59
	5	**-1.3458**	18.99
	6	**-1.1646**	14.53
	8	-	-
	10	-	-

Se realizaron 10 ejecuciones por número de temas en cada algoritmo, promediando coherencia y tiempo. LDA logró su mejor coherencia con 10 temas (-1.1283) y un tiempo de 0.438 s. STM obtuvo su mejor coherencia con 10 temas (-1.1425) y tiempos entre 2.6–3.3 s. BERT alcanzó su mejor coherencia con 6 temas (-1.1646), aunque con un tiempo promedio mayor.

Por otra parte, en la Tabla 3 se muestran los resultados de coherencia promedio y tiempo de ejecución correspondientes al conjunto de datos NO ARL, donde nuevamente se evaluaron los algoritmos LDA, STM y BERT bajo diferentes números de temas. En este caso LDA logró su mejor coherencia con 10 temas (-2.1365) y un tiempo de 0.4453 s, destacando por su eficiencia. STM obtuvo coherencia similar (-2.1767) pero con tiempos de 7–10 s, mientras que BERT mostró coherencias menores (-4.5945 a -6.6854) y tiempos superiores a 13 segundos. Los resultados indican que, aunque BERT y STM tuvieron buen desempeño, LDA fue más rápido y coherente. Además, BERT no permitió más de seis temas, lo que restringe su capacidad para identificar tópicos.

Tabla 3 Comparación de algoritmos *corpus* NO ARL

Algoritmo	Número de Temas	Promedio Coherencia	Promedio de tiempo
LDA	3	-2.4363	**0.8209**
	5	**-2.3165**	**0.5543**
	6	**-2.2776**	**0.8739**
	8	**-2.2048**	**0.4342**
	10	**-2.1365**	**0.4453**
STM	3	**-2.4079**	7.488
	5	-2.4307	8.52
	6	-2.3493	9.994
	8	-2.2373	9.343
	10	-2.1767	10.597
BERT	3	-5.5405	13.46
	5	-4.5945	13.88
	6	-6.6854	13.882
	8	-	-
	10	-	-

Ante este contexto, se eligió el algoritmo LDA para generar y analizar los temas de los conjuntos de datos. Para validar la interpretación de los resultados, se contó con la colaboración de un experto en lenguas indígenas con amplia experiencia en docencia en educación superior. Al especialista se le presentaron diversas pruebas con 5, 8, 10, 15, 20 y 30 temas, con el propósito de determinar cuál ofrecía una interpretación más clara y representativa. Tras analizar cada resultado, el experto concluyó que, en el caso del conjunto ARL, la configuración con 20 temas mostraba mejor interpretabilidad. En esta prueba, el tiempo total de ejecución fue de 0.732 segundos y la coherencia promedio alcanzó -0.9151, evidenciando un desempeño sólido y adecuado del algoritmo. Los resultados de esta prueba se muestran en la tabla 4.

Tabla 4 Palabras clave para 20 temas *corpus* ARL

Palabras clave por tema
Tema 1: clases entender profesor horario tengas cuestiones cuales hacer dice solamente pronunciar económicamente preparar plan foráneo aplicarme mamá filosofía comentarios
Tema 2: dificulta luego siento hora igual biblioteca leer estudiar horas aprender tiempo interesado verdad refiere desconozco palabra cuando salida libros concentración
Tema 3: compañeros adicciones cuestiones forman estas afortunadamente alcohol droga adictos un problema actualmente comunicación situación siempre
Tema 4: escuela hace seguir todas general tus dificulte comprensión nada nuevamente trabajando estuve temporalmente estudios años tres agradable satisfecha ello durmiendo
Tema 5: palabras algunas bien veces debido comprensión toda clases hermanos información procesar logro somos decir público expresarme tratar entenderles
Tema 6: carrera económico situaciones apoyo lograr padre universidad temporal baja superarme vida sentido darle finados origen asistir tenía foránea traen esas
Tema 7: salud aprendizaje problemas económicas dificultades recursos clima cuento padres económicos personales cara específico visual teóricas disposición mala mejoren obtener
Tema 8: semana transporte dinero veces renta comida falta económico viajar pagar familia llegar gastos gasto necesario acompleta salud mucho sería diario cerca
Tema 9: desempeño llevo trabajos jefatura cooperaciones realizar tipo cansado alérgica presentó óptimo estancia mantener facilidades brindado principio tratamiento exclusión
Tema 10: nosotros día escuchar razonamiento estudiantes encuentra expresarlo limitan entendamos debido crecer oportunidad tenemos contrario orígenes olvidar implica queremos
Tema 11: bien hasta puedo estudiando factor muchas estamos ahí hemos varios español ahorita quitan terminar familias familia influye ido dinero siempre
Tema 12: cosas trabajo ver temas comprender dificultad terminologías rutina ala adaptarme poner abandoné estudios pagando pudieron responder sabía hacían exponer profes
Tema 13: gastos estoy problemática tiempo actividades sueño gustaría desde económicamente entre muchos propios ámbito personales estrés realizar pierda regreso mamario
Tema 14: profesores algunos forma clases dudas afecta hablan particular favorito muestran alguno generadas resuelvan formular considero plasmado viene embargo proceso explicar
Tema 15: momento hasta problema problemas universidad problemática relación creo pesado semestres único transcurso algún tedioso enomico alguna veracruz citas respecto relacionados
Tema 16: problemas económicos salud familiares recurso condiciones acondicionado regresé independientemente oaxaca médicas faltado varias transportarme mamá trayectoria principalmente alimentación influyen presento
Tema 17: manera lenguaje distancia beca unpa llega nomás posterior resueltas bibliografías barreras presentado excelente amigo ingresos tuxtepec pueblos oriundo estudiante cualquier
Tema 18: lengua indígena hablar hablo entiendo problema comunicarme materna personas compañeros ellos rien tocado discriminada alegra bastante hablado perfectamente menos hacen
Tema 19: horarios calificaciones universidad tarde ella materias alumnos clase tomar ningúno continuar después emocionales paternos aledaños consideran hacia lejanía libres muchas
Tema 20: problema mucho difícil lugar casa moto pieza robaron estacionamiento nuevo adaptarse lejos absolutamente economícos muerte pido vuelta ida papas único

Por otra parte, para el conjunto de datos de los NO ARL también se realizaron pruebas con diferentes números de temas (5, 8, 10, 20, 25 y 30). El número de temas seleccionado por el experto fue el de 30, el cual obtuvo un promedio de coherencia de -1.3538 y un tiempo de ejecución de 0.844 segundos, evidenciando un desempeño estable. En la Tabla 5 se presentan las palabras clave de cada uno de los 30 temas, lo que permitió identificar de manera precisa las problemáticas.

Tabla 5 Palabras clave para 30 temas *corpus* NO ARL

Palabras clave por tema
Tema 1: económicos problemas familiares universidad personales transportarme puesto continuar darle finados origen lugar tenía emocionales ello hora alimentación influyen presento
Tema 2: dinero económico situación prestado pido toda quedo viernes jueves aparte vuelta ida urbano pesos papas hace sinceramente estado
Tema 3: igual aprendizaje luego económica horario solamente mejoren capacidad alcanza despensa comprar genera pueblo mes complica adaptando iré siento maneja
Tema 4: económico carrera apoyo gustaría estudiando universidad problema estoy alumnos muestran realizar relación temporal baja sueño profesional gran terminar obviamente
Tema 5: responder sabia preguntas hacian exponer pasar profes interractuar licenciatura tuve uno problemas

Palabras clave por tema
Tema 6: dificultades salud problemas económicas clases clima cuento padres mamá, situaciones semana ganas cambio trabajo derivados únicamente entender tarras entregue
Tema 7: bien siento puedo cosas dificulta hasta comprensión leer hora trabajo factor temas comprender dificultad muchas horas general aprender nomás bastante
Tema 8: situaciones mucho lograr padre superarme trayectoria vida sentido principalmente después asistir foránea traen afectó paternos maternos abuelos familiar muerte
Tema 9: hasta económicamente ella pide ahorita barreras presentado lenguaje camión usar traigo veces madre hija semestres enfáticas cursaba contabilidad dificulto
Tema 10: escuela seguir hace condiciones nuevamente regresé independientemente estuve temporalmente abandoné pagando pudieron tres óptimo agradable estancia mantener facilidades brindado excelente
Tema 11: tengas complicado hacer economicamente preparar plan foranea entenderles filosofía alérgica rinitis presentó comentarios equipo tercera clases
Tema 12: gastos cuestiones tiempo actividades escuela recursos muchos necesario propios ámbito personales,y salud mucho realizar aplicarme obtener apoyar bajos económicas apoyo falta
Tema 13: adicciones distancia forman estas afortunadamente alcohol droga alguna esas ingresos aledaños pueblos oriundo estudiante cualquier diarios obstáculos compañeros
Tema 14: llevo estamos siempre grupo hemos compañeros bien palabras decir público expresarme tratar ver cansado ningúno médico tratamiento trabajos consideran
Tema 15: dudas clases generadas resuelvan formular posterior escuchar razonamiento pueden considero plasmado viene bibliografías encuentra expresarlo limitan entendamos proceso explicar debido
Tema 16: semana renta transporte comida veces viajar pagar tuxtepec familia gasto recurso cuenta particular acompleta cara sería relación académico extraña haciéndolo
Tema 17: atención beca casi materias llega callan lindo ingresar documentos alimenticia necesidades gastos matemáticas claro preparatoria últimos usarlas acostumbrada matematicas unpa
Tema 18: nosotros día resueltas embargo específico cooperaciones crecer oportunidad tenemos contrario orígenes olvidar implica esto queremos decidimos mismos cambiante somos
Tema 19: biblioteca dificulta horarios luego clase libros concentración calor mucha acondicionado aire prenden gente mucha hacia transporte lejanía libres muchas flexibles
Tema 20: profesores algunos forma universidad aprendizaje favorito estudiantes exámenes dando malísimos mantienen desvelo términos manera permanecer conocimiento transmitir acopla impartir saben
Tema 21: problema lengua indígena hablo entiendo compañeros ellos ríen hablan tocado discriminada alegra interesado hablado verdad español ver mucho materna

Palabras clave por tema
Tema 22: salud problemas desempeño calificaciones afecta visual teóricas mamá actualización aislados directamente mamario problema yendo actualmente sentido afectan exclusión
Tema 23: estudios estudiar algún jefatura rutina ala adaptarme dificulte trabajando años hora trabajo cuesta necesarios medicamentos quien enfermarme días horario
Tema 24: problemática profesor palabras entender cuales dice refiere desconozco palabra pronunciar comprensión exigentes entiendo escucho chamacos cuesta incluyéndome solos quedan personas
Tema 25: veces algunas debido dinero estrés limitado hermanos varios procesar logro cuanto absolutamente somos adictos estudiando familiares mal toda desayunar materiales
Tema 26: hablar personas comunicarme perfectamente difícil menos hacen tipo burlan amigo manera esa trata mexicana señas lenguaje materna lengua
Tema 27: problema casa único transcurso nuevo adaptarse lejos económicos Veracruz Oaxaca médicas citas faltado varias respecto lugar materia llegar agarrar bien
Tema 28: horarios tiempo estoy tarde desde clases salida quitan desayuno tomar tenga gracias pude toco campus hogar doble pasaje solventan pesado
Tema 29: momento hasta problemática problema problemas creo universidad tedioso diario cerca difícil económico alguna relacionados comunicación pesado
Tema 30: también moto pieza robaron estacionamiento disposición mala profesor aprendizaje día desafortunadamente días soltera entre superior familiarizada estaba tecnología

En base a la interpretación del experto, se identificaron múltiples problemáticas que afectan a los estudiantes universitarios, relacionadas con aspectos académicos, personales, familiares, de salud y del contexto institucional. Su análisis fue fundamental para reconocer los factores que influyen en el desempeño y la formación profesional de los alumnos. Las principales problemáticas detectadas fueron:

1.- Problemas de integración: Problema de ausencia de interacción completa y sana con sus compañeros y profesores.

2.- Problemas de marginación: Problema ocasionado por la acción directa de un compañero o grupo de compañeros para impedir que el alumno se integre a las dinámicas de su grupo.

3.- Problemas económicos: Problema relativo a la falta de recursos monetarios del alumno para cubrir los gastos derivados de su estancia en la universidad.

4.- Problemas familiares: Problemas relativos a las dinámicas propias de su entorno familiar.

5.- Problemas relacionados con la lejanía del centro escolar: Problemas derivados del alejamiento de su sitio de residencia y entorno familiar por razón de asistencia a la universidad.

6.- Problemas de salud física. Problemas relativos a la falta de bienestar físico que permite realizar actividades cotidianas.

7.- Problemas de salud mental: Problemas relativos a la falta de bienestar emocional, psicológico y social que permiten realizar las actividades cotidianas.

8.- Problemas de adicciones: Problemas relativos a padecer una enfermedad física y psicoemocional que crea una dependencia o necesidad hacia una sustancia, actividad o relación.

9.- Problemas de comprensión de contenidos académicos: Problemas que son referidos como la dificultad individual o personal para apropiarse de los contenidos académicos revisados en un curso universitario.

10.- Problemas personales: Problemas relativos a la circunstancia personal de la alumna o alumno.

11.- Problemas de administración del tiempo: Problemas relativos a la incapacidad de planificar, organizar y controlar el uso del tiempo disponible para realizar tareas de manera eficiente y productiva.

12.- Problemas de condiciones físicas y de servicios del espacio educativo: Problemas relativos a la infraestructura servicios y equipamiento del centro universitario.

13.- Problemas de falta de material didáctico: Problemas relativos a la falta de material de aprendizaje en los espacios universitarios.

14.- Problemas de posible deserción (trabajo o salud): Problemas relativos al posible abandono del programa educativo por razones de trabajo o salud.

15.- Problemas de rendimiento: Problemas relativos al rendimiento escolar (no relacionado con calificaciones) por cansancio.

16.- Problemas de horario: Problemas relativos al horario de clases.

En cuanto a la distribución entre conjuntos de datos, el análisis del experto permitió identificar que las problemáticas señaladas en las problemáticas 6, 8 y 10 fueron exclusivas del conjunto de datos de los ARL. Por su parte, las problemáticas 12, 13, 14, 15 y 16 se identificaron únicamente en el conjunto de datos de los NO ARL. Por su parte las problemáticas 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9 y 11 se presentaron en ambos conjuntos de datos, constituyéndose como elementos comunes.

5. CONCLUSIONES

Los algoritmos de NLP son herramientas muy útiles que permiten procesar grandes volúmenes de datos textuales de manera eficiente, especialmente cuando se trata de respuestas a preguntas abiertas en encuestas. Con base en los experimentos realizados en este trabajo, se observó que es importante analizar con detalle el tipo de *corpus* y el número de temas a identificar, ya que de ello depende la calidad interpretativa de los resultados. Por otra parte, respecto al desempeño obtenido, se constató que LDA fue el algoritmo que alcanzó mejores resultados en términos de coherencia y tiempo de ejecución. La principal contribución de este artículo fue el análisis comparativo entre los algoritmos LDA, STM y BERT, considerando su desempeño en coherencia temática y eficiencia en el procesamiento de dos conjuntos de datos. Este análisis permitió identificar las principales problemáticas recurrentes en los estudiantes, validadas a través de la colaboración de un experto.

Finalmente, como trabajo a futuro se plantea el desarrollo de un software que automatice todo el proceso de análisis, desde el preprocesamiento de los datos hasta la validación de los resultados, permitiendo aplicar estas técnicas no solo a encuestas sobre riqueza lingüística, sino también a cuestionarios de distintos ámbitos. De esta manera, se busca contar con una herramienta versátil que facilite la interpretación de grandes volúmenes de datos y brinde apoyo a la toma de decisiones en diversos contextos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo por parte del Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y a la Secretaría de Educación Pública (SEP) por el soporte financiero, así como al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba y a la UNPA por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Alshaikh, K. A., Almatrafi, O., & Abushark, Y. B. (2023). BERT-based model for aspect-based sentiment analysis for analyzing Arabic open-ended survey responses: A case study. IEEE Access, 11, 144151–144161. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3342661

Baburajan, V., Da Silva, J.D.A.E. and Pereira, F.C. (2021). Open-ended versus closed-ended responses: A comparison study using topic modeling and factor analysis. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(4), 2123–2132. https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3040904

Bardutz, E. and Bigazzi, A. (2022). Communicating perceptions of pedestrian comfort and safety: Structural topic modeling of open response survey comments. *Journal of Transport & Health*, 26, 101499. https://doi.org/10.1016/j.jth.2022.101499

Bazzan, A.L.C., Tavares, A.R., Pereira, A.G., Jung, C.R., Scharcanski, J., Carbonera, J.L., Lamb, L.C., Recamonde-Mendoza, M., da Silveira, T.L.T. and Moreira, V. (2023). A nova eletricidade: Aplicações, riscos e tendencias da IA moderna. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.18324

Blei, D. M., Ng, A. Y., & Jordan, M. I. (2003). Latent Dirichlet allocation. *Journal of Machine Learning Research, 3*, 993–1022.

Candela Rojas, E.C. and Cañari Huerta, E.G. (2022). *Machine learning para la categorización de respuestas de preguntas abiertas.*

Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. En Proceedings of the 2019 Conference of the North

American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies (Vol. 1, pp. 4171-4186). Minneapolis, Minnesota: Association for Computational Linguistics. https://doi.org/10.18653/v1/N19-1423

Du, K. (2022). Evaluating hyperparameter alpha of LDA topic modeling. In *Proceedings of the Digital Humanities Conference (DHd 2022)*.

González Canché, M.S. (2023). Machine driven classification of open-ended responses (MDCOR): An analytic framework and no-code, free software application to classify longitudinal and cross-sectional text responses in survey and social media research. *Expert Systems with Applications*, 215, 119265. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119265

Grönberg, N., Knutas, A., Hynninen, T. and Hujala, M. (2021). Palaute: An online text mining tool for analyzing written student course feedback. *IEEE Access*, 9, 134518–134529. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3113878

Hahn, S., Kroehne, U. and Merk, S. (2024). Improving and analyzing open-ended survey responses: A case study linking psychological theories and analysis approaches for text data. *Zeitschrift für Psychologie*, 232(3), 171–180. https://doi.org/10.1027/2151-2604/a000566

Hernández-Orallo, J., Martínez-Plumed, F. and Muñoz-Nieto, F. (2022). A meso-scale cartography of the AI ecosystem. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.12263

Inoue, M., Fukahori, H., Matsubara, M., Yoshinaga, N. and Tohira, H. (2023). Latent Dirichlet allocation topic modeling of free-text responses exploring the negative impact of the early COVID-19 pandemic on research in nursing. *Japan Journal of Nursing Science*, 20(2), e12520. https://doi.org/10.1111/jjns.12520

Jayaratne, M. and Jayatilleke, B. (2020). Predicting personality using answers to open-ended interview questions. *IEEE Access*, 8, 115345–115355. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3004002

Li, Y., Du, H., Martin, I., Hidalgo, E., Jiang, Y., Xing, W. and Popov, V. (2023). Exploring adolescents' occupational possible selves: The role of gender and socioeconomic status. *The Career Development Quarterly*, 71(3), 189–205.

McCallum, A. K. (2002). *MALLET: A Machine Learning for Language Toolkit*. Recuperado de https://mimno.github.io/Mallet/

Mallet: MAchine Learning for LanguagE Toolkit. (s. f.). Mallet. https://mimno.github.io/Mallet/index

Nawaz, R., Siddique, F.B., Shafi, K., Boulay, F. and Arshad, J. (2022). Leveraging AI and machine learning for National Student Survey: Actionable insights from textual feedback to enhance quality of teaching and learning in UK's higher education. *Applied Sciences*, 12(1), 514. https://doi.org/10.3390/app12010514

Pietsch, A.S. and Lessmann, S. (2018). Topic modeling for analyzing open-ended survey responses. *Journal of Business Analytics*, 1(2), 93–116.

Roberts, M. E., Stewart, B. M., & Tingley, D. (2019). *stm: An R Package for Structural Topic Models*. Journal of Statistical Software, 91(2), 1–40. https://doi.org/10.18637/jss.v091.i02 jstatsoft.org

Röder, M., Both, A. and Hinneburg, A. (2015). Exploring the space of topic coherence measures. In *Proceedings of the eighth ACM international conference on Web search and data mining* (pp. 399–408). ACM.

Rosner, F., Röder, M., Nettling, M., Both, A., & Hinneburg, A. (2014). *Evaluating topic coherence measures*. arXiv preprint arXiv:1403.6397.

Smoll, N.R., Walker, J. and Khandaker, G. (2021). The barriers and enablers to downloading the COVIDSafe app – a topic modelling analysis. *Australian and New Zealand Journal of Public Health*, 45(4), 344–347. https://doi.org/10.1111/1753-6405.13119

Srebrovic, R. and Yonamine, J. (2020). Leveraging the BERT algorithm for patents with TensorFlow and BigQuery. *White paper.*

Torrao, G., Htait, A., & Wong, S. H. S. (2024). Perceptions of women's safety in transient environments and the potential role of AI in enhancing safety: An inclusive mobility study in India. *Sustainability, 16*(19), 8631. https://doi.org/10.3390/su16198631

Tvinnereim, E., Fløttum, K., Gjerstad, Ø., Johannesson, M.P. and Nordø, Å.D. (2017). Citizens' preferences for tackling climate change: Quantitative and qualitative analyses of their freely formulated solutions. *Global Environmental Change*, 46, 34–41. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.06.005

Van Buchem, M.M., Neve, O.M., Kant, I.M.J., Steyerberg, E.W., Boosman, H. and Hensen, E.F. (2022). Analyzing patient experiences using natural language processing: Development and validation of the artificial intelligence patient reported experience measure (AI-PREM). *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 22(1), 183. https://doi.org/10.1186/s12911-022-01923-5

Visual Studio Code - Code editing. Redefined. (2021, 3 noviembre). https://code.visualstudio.com/

Zucco, C., Paglia, C., Graziano, S., Bella, S., & Cannataro, M. (2021). Sentiment analysis of medical questionnaires to improve adherence to telemonitoring programs. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 2994, pp. 323–330). CEUR-WS.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Anomaly Detection in Heart Sounds Using Daubechies Wavelet Analysis and MFCCs Through Machine Learning Techniques

Sebastian Guzman-Alfaro * **Manuel A. Soto-Murillo** *
Antonio Baltazar-Raigosa * **Jorge Issac Galvan-Tejada** *
Angel Garcia-Duran * **Jose M. Celaya-Padilla** *

* *Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas 98000, México. (e-mail: sebastian.guzman@uaz.edu.mx)*

Abstract: Cardiovascular diseases are the leading cause of death in Mexico and worldwide, according to the National Institute of Statistics and Geography (INEGI). This work builds machine learning models (logistic regression and SVM) to classify normal vs. abnormal heart sounds acquired by a digital stethoscope. From 300 recordings (200 normal, 100 abnormal), features were extracted using Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs) and Daubechies wavelets. Data were split 80/20 for training/testing and validated with 5-fold cross-validation. The best model achieved an accuracy 0.82, a recall 0.55, and an AUC 0.86, indicating a feasible approach for automated heart-sound analysis.

Keywords: Heart sounds; Machine learning; Mel Frequency Cepstral Coefficients; Daubechies wavelets.

1. INTRODUCTION

The evolution of artificial intelligence in recent decades has significantly impacted the field of engineering, particularly in its branch of electronic-biomedical engineering, especially in the diagnosis and detection of various diseases (Ahuja, 2019). In this context, cardiology plays a fundamental role, as heart diseases have been the leading cause of death in Mexico and worldwide for several years and are expected to remain so over the next decade (Gaidai et al., 2023; Li et al., 2020). Therefore, it has become a top priority to develop automated tools for the detection and diagnosis of heart diseases, with the aim of serving as an extension of the physician to optimize and enhance their work. Such tools can assist in identifying cardiopathies and enable timely treatment before the patient's life is put at risk.

From an anatomical and physiological perspective, the heart is the central organ of the cardiovascular system, located in the thorax. It is essential for supplying oxygen to all body tissues and extremities; therefore, its proper functioning directly affects overall health and human quality of life (Nietos Miguel, 2007; Ballesteros, 2009).

The heart is a major source of information which, when analyzed from a medical-engineering perspective, can be used for various applications. Among the different forms of information emitted by the heart are the sounds it produces, which are particularly relevant in many respects. Heart sounds are generated by the mechanical vibrations caused by valve closures during the cardiac cycle and are fundamental for identifying cardiovascular diseases (Tamargo, 2005; Rubira, 2009; Dwivedi et al., 2018), as they allow physicians to thoroughly analyze the cardiac cycle process.

When functioning normally, the heart produces a repetitive pattern of sounds. However, in the presence of cardiac abnormality, this pattern becomes distorted, which may indicate a high probability of heart disease (Ari et al., 2008; Jacobs, 1990). These distortions can be automatically detected using digital signal processing (DSP) techniques in combination with machine learning (ML) models.

The automatic classification of heart sounds using Machine Learning (ML) algorithms and Digital Processing Signals (DSP) techniques represents a promising research area. Some studies have already proposed machine learning–based algorithms to detect cardiac abnormalities from heart sound signals. For instance, in the work of Yasser Zeinali and Seyed Akhavan, a binary classification model distinguishing between normal and abnormal heart sounds achieved an accuracy of 81% using machine learning techniques such as support vector machines (Zeinali and Niaki, 2022).

In this research work, we utilized a dataset of heart sounds, carried out pre-processing and signal analysis using the MFCC and Wavelet Daubechies to build classification models. These models were trained using support vector machines (SVM) and logistic regression to predict whether a patient presents any cardiac abnormalities.

2. MATERIALS AND METHODS

In this study, the procedure implemented to classify heart sounds as pathological or non-pathological is illustrated in Fig. 1. Firstly, it begins with the acquisition of au-

dio samples from the Classifying Heart Sounds Challenge (PASCAL). Next, the data underwent processing and feature extraction in both the time and frequency do-mains. These features were then subjected to a feature selection process to feed the ML classifiers. Finally, the classifiers were evaluated using different metrics to analyze their performance.

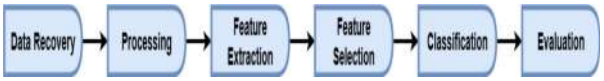


Fig. 1. Flowchart of the proposed methodology.

2.1 Database Acquisition

We use the *Classifying Heart Sounds Challenge (PASCAL)* public database (Bentley et al., 2016), which contains normal and abnormal heart sounds. The database includes 312 audio recordings captured using a digital stethoscope in clinical environments. All audio files are in ".wav" format. The database contains 66 recordings categorized as murmurs (pathological), 46 as extrasytolic sounds (pathological), and 200 recordings labeled as normal.

2.2 Database Processing

To build a classification model capable of predicting whether a person has cardiopathy or not, a new abnormal audio class was created by merging the murmur and extrasytolic sound classes, resulting in 112 abnormal recordings.

Some cardiac conditions cannot be detected within a single cardiac cycle, which lasts around 0.8 seconds. Therefore, after recategorization, all heart sounds recordings were trimmed to 3 seconds to ensure the inclusion of more than one cardiac cycle. Audio files that did not meet the time were removed, resulting in 200 normal and 92 abnormal recordings.

As part of the experimental design, the model was trained under a class-imbalanced scenario (2:1 ratio), where the normal class was dominant, to emulate a more realistic clinical setting since there are more healthy individuals than those with cardiac issues. Abnormal recordings were randomly selected and processed through an audio augmentation technique: a segment corresponding to one cardiac cycle was extracted from the beginning and duplicated at the end until reaching the required 3-second duration. This resulted in a final dataset of 200 normal and 100 abnormal recordings.

Each audio file corresponds to a distinct subject; therefore, the train/test split was performed at the file level, ensuring that no samples from the same patient appear simultaneously in both sets, thereby avoiding data leakage.

2.3 Feature Extraction

Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs) and Daubechies Wavelet Analysis were used with the objective of developing a hybrid model that leverages the strengths of both techniques.

MFCCs.

MFCCs are a technique designed to emulate human auditory perception, particularly through the variation of the filter bank. On the other hand, Daubechies Wavelet Analysis enables more effective feature extraction from non-stationary signals, such as those produced by the heart.

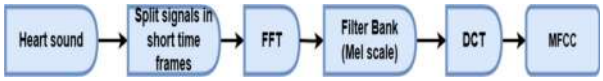


Fig. 2. Block diagram for the calculation of the Cepstral Frequency Mel Coefficients (MFCC).

Fig.2. Illustrates the process required to extract MFCCs. It begins with the definition of the windowing function (25 ms), the smoothing function (Bartlett), and the step size (10 ms). Then, the Fourier Transform is applied to each window to obtain a frequency spectrogram. After that, a Mel filter bank is applied, com-posed of triangular filters distributed along the Mel scale, and calculated using Equation 1:

$$B(m,k) = \begin{cases} \dfrac{k - f(m-1)}{f(m) - f(m-1)}, & f(m-1) \le k \le f(m) \\ \dfrac{f(m+1) - k}{f(m+1) - f(m)}, & f(m) \le k \le f(m+1) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{1}$$

Where $B(m,k)$ is the filter bank matrix (26), m is the filter bank index, and k is the index of frequency bins (298).

Before applying the logarithmic operation, the energy of each filter bank is computed by multiplying each filter with the power spectral density and summing the resulting coefficients as shown in Equation 2.

$$E(m,k) = \sum_{m=1}^{M} B(m,k)\, P(k), k = 298 \tag{2}$$

Where $P(k)$ is the power spectral density, and k represents the frequency bin index.

Next, the logarithm of each energy value is calculated in Equation 3

$$E_{\log}(m,k) = \log\left(\sum_{m=1}^{M} B(m,k)\, P(k)\right), \tag{3}$$

Finally, the Discrete Cosine Transform (DCT) of the log-energy value is applied to obtain MFCCs (Bezoui et al., 2016; Reig Albiñana, 2015), as expressed in Equation 4.

$$\text{MFCC}(n) = \sum_{m=1}^{M} E_{\log}(m,k)\, \cos\left[n\left(m - \tfrac{1}{2}\right)\tfrac{\pi}{M}\right]. \tag{4}$$

Where M is the total number of MFCCs. In this study, experiments were carried out with $M \in \{8, 12, 20, 26\}$ MFCCs.

Wavelet Daubechies.

The Wavelet Daubechies are basis functions used in the Discrete Wavelet Transform (DWT) (Equations 5 , 6 which allow the analysis of signals at multiple resolutions and scales. Their main characteristic is that they are orthogonal.

$$C_{j,k} = \langle f, \psi_{j,k} \rangle \tag{5}$$

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2}\, \psi(2^{-j}t - k) \tag{6}$$

Where f is the signal being analyzed, $\psi_{j,k}(t)$ is the scaled and translated mother Wavelet and $C_{j,k}$ are de DWT coefficients.

During multiresolution decomposition, the DWT uses filter banks (high-pass and low-pass) to separate the approximation (Equation 7) and details (Equation 8) (Hubbard, 1999).

$$A[n] = \sum_k h[k]\, f[2n - k] \tag{7}$$

$$D[n] = \sum_k g[k]\, f[2n - k] \tag{8}$$

Where $h[k]$ and $g[k]$ are the Daubechies filter coefficients. Finally, for each obtained subband C, five statistical features are computed, as shown in Table 1.

Table 1. Statical Features Extracted from Daubechies Subbands.

Feature	**Equation**
Mean	(9)
Variance	(10)
Standard Deviation	(11)
Energy	(12)
Shannon Entropy	(13)

$$m_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} c[i] \tag{9}$$

$$\mathrm{Var}(c) = \sigma_c^2 \tag{10}$$

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_c^2} \tag{11}$$

$$E = \sum_{i=1}^{N} c[i] \tag{12}$$

$$H_c = -\sum_{i=1}^{N} p[i] \cdot \log\big(p[i]\big) \tag{13}$$

For this study, three different Daubechies wavelets (db4, db6 and db8) utilized, each one of these with 4 (A4, D4, D3, D2, D1), 6 (A6, D6, D5, D4, D3, D2, D1) and 9 (A9, D9, D8, D7, D6, D5, D4, D3, D2, D1) subbands respectively. A total of 36 datasets were generated, each corresponding to a combination of one MFCC configuration with one Daubechies Wavelet. The heart sound classes were labeled as 0 for normal and 1 for abnormal, respectively.

The resulting datasets were normalized using the Z-score technique, in which each feature does not have a defined maximum or minimum value, but its means is always zero (Equation 14)

$$X_{\text{stand}} = \frac{X - \mu}{\sigma}, \tag{14}$$

Where X_{stand} the standardized value, X is the original value, μ is the mean of the original value, and σ is its standard deviation.

All datasets were used to classify heart sounds, with 80% of the data allocated for training and 20% for testing.

2.4 Feature Selection

Two methodologies were used for this process: *Forward Selection* and *Boruta algorithm*. The first method consists of selecting an optimal subset of features that directly impacts the model's performance through an iterative process. It starts with an empty model and adds one variable at a time. If the added variable improves the model's performance, it is retained; otherwise, it is discarded (Kamalov et al., 2024; Kursa et al., 2010).

The second technique used is based on random forest models, where the goal is to identify all features relevant to the model, not just an optimal subset as in forward selection.

The selected features were used as input for the classification model, resulting in two models, one for each feature selection technique applied.

For the Boruta algorithm, a Random Forest classifier with 100 base estimators and 'balanced' class weights was used, allowing automatic adjustment of the number of trees (`n-estimators='auto'`). The process iteratively removed features deemed irrelevant based on shadow attributes until all important variables were confirmed.

For the Forward Selection approach, the logistic regression model was used as the estimator, adding one feature at a time. The process stopped when the inclusion of a new feature did not improve the F1-macro score, as evaluated by 5-fold cross-validation

2.5 Classification

Two machine learning techniques were used for the classification of heart sounds.

Logistic Regression (LR).

This machine learning technique aims to study categorical dependent variables and a set of independent variables to produce one of two possible outcomes: 0 or 1 (Park, 2013). The `LogisticRegression` class from `scikit-learn` was used with its default parameters, except for the maximum number of iterations, which was set to 1000.

Support Vector Machine (SVM).

It is a machine learning technique aimed at finding the best decision boundary or optimal hyperplane that leads to homogeneous data partitions on both sides (Srivastava & Bhambhu, 2010). The `SVC` class from `sklearn.svm` was

used, along with hyperparameter tuning via GridSearch with 5-fold cross-validation. A fixed random seed (`random state=42`) was set to ensure reproducibility.

2.6 Evaluation

To evaluate the performance of the created hybrid feature models, the `sklearn.metrics, matplotlib, seaborn` and `numpy` libraries were used to analyze the results both numerically and graphically using the following evaluation metrics (Srivastava & Bhambhu, 2010):

- **Accuracy:** It is the proportion of correctly classified samples with respect to the total. It is calculated as shown in Equation 15.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{True Positives} + \text{True Negatives}}{Total\ examples} \quad (15)$$

- **Recall:** It measures the proportion of true positive cases that were correctly detected by the model. It is calculated as shown in Equation 16.

$$\text{Recall} = \frac{\text{True Positives}}{\text{True Positives} + \text{False Negatives}} \quad (16)$$

- **F1-score:** It represents the harmonic mean between precision and recall. It is calculated as shown in Equation 17

$$\text{F1 score} = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (17)$$

- **ROC:** Receiver Operating Characteristics (ROC) provides an overall measure of diagnostic accuracy, which is independent of the decision threshold and prevalence. It is obtained by plotting sensitivity (or recall) on the vertical axis and 1-specificity (false positive rate) on the horizontal axis (Miller et al., 2024). From this metric, we can derive the Area Under the Curve (AUC), which ranges between 0 and 1 and is one of the main metrics used to evaluate model performance.

3. RESULTS

The results obtained from the different hybrid models are presented in Table 2, where the top 15 models are shown 10 based on SVM and 5 on logistic regression using different features, coefficients, and feature selection methods. The first column indicates the classification technique used in each model, while the second column shows the dataset employed. The third column displays the feature selection method. The fourth column presents the number of features used. The fifth column indicates the class type. The sixth column contains the average accuracy across both classes. The following columns show the individual evaluation metrics: column seven reports the recall, column eight the F1-score, and column nine the AUC.

Table 2. Evaluation metrics of hybrid MFCC–Wavelet classifiers for both classes.

Method	Dataset	Sel.	#Feat	Acc.	Recall		F1-score		AUC
					(0)	(1)	(0)	(1)	
LR	20 MFCC + db6 (4C)	Fwd	20	0.8167	0.95	**0.55**	0.8736	0.6667	**0.865**
LR	12 MFCC + db6 (4C)	Fwd	10	0.7830	0.95	0.45	0.8539	0.5806	0.8413
LR	8 MFCC + db4 (6C)	Fwd	20	0.7667	0.85	0.45	0.8000	0.5143	0.8150
LR	12 MFCC + db6 (9C)	Fwd	10	0.7833	0.95	0.45	0.8539	0.5806	0.8513
LR	20 MFCC + db6 (9C)	Fwd	10	0.7500	0.90	0.45	0.8276	0.5455	0.8113
SVM	8 MFCC + db6 (6C)	Fwd	25	0.8167	0.975	0.50	0.8764	0.6452	0.7975
SVM	8 MFCC + db8 (9C)	Fwd	10	0.8333	0.95	0.50	0.8889	0.6670	0.8237
SVM	12 MFCC + db4 (4C)	Fwd	10	0.8000	1.00	0.50	0.8636	0.6250	0.7337
SVM	12 MFCC + db6 (6C)	Fwd	10	0.8167	0.95	0.55	0.8736	0.6667	0.7775
SVM	12 MFCC + db8 (6C)	Fwd	15	0.8167	0.975	0.50	0.8764	0.6452	0.8425
SVM	20 MFCC + db8 (6C)	Fwd	15	0.8167	0.975	0.50	0.8764	0.6452	0.8025
SVM	20 MFCC + db8 (6C)	Bor	11	0.8167	0.975	0.50	0.8764	0.6452	0.8025
SVM	26 MFCC + db6 (4C)	Bor	11	0.8000	0.95	0.50	0.8636	0.6250	0.7913
SVM	26 MFCC + db8 (6C)	Bor	11	0.7833	0.90	0.55	0.8471	0.6286	0.6775
SVM	26 MFCC + db8 (4C)	Bor	9	0.7833	0.925	0.50	0.8506	0.6250	0.7913

Fwd = Forward Selection; Bor = Boruta. Class (0) = normal, Class (1) = abnormal.

Model performance was evaluated using 5-fold cross-validation on the training set, and the metrics reported in Table 2 correspond to the mean values obtained across the five folds. Although additional repetitions with different random seeds were not conducted, the 5-fold cross-validation provides a reliable estimate of model generalization.

According to the results obtained, given the medical problem being addressed, it is important to prioritize recall and AUC as the main evaluation metrics. Therefore, the most outstanding model is highlighted in bold, achieving a recall of 0.55 and an AUC of 0.86; its ROC curve and Confusion matrix are in Figs. 3 and 4, respectively.

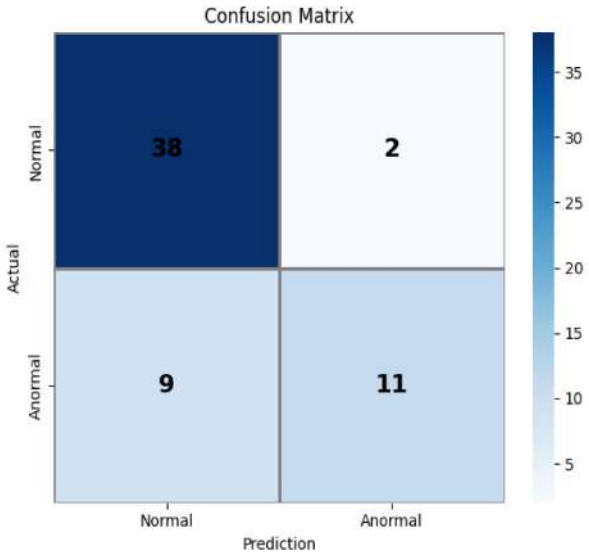


Fig. 3. The Confusion matrix of best model obtained.

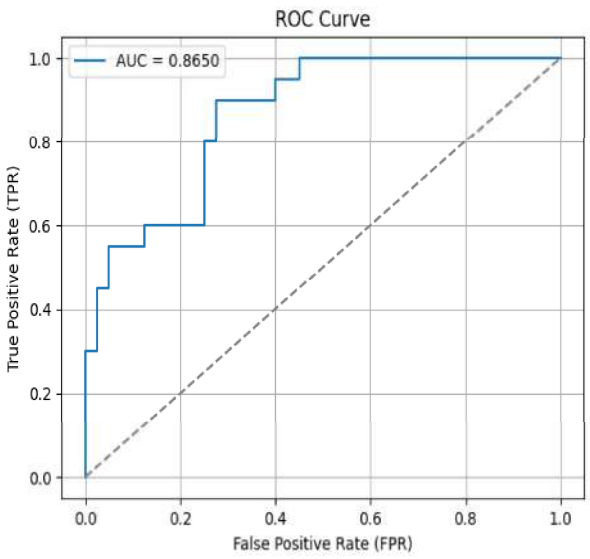


Fig. 4. ROC Curve of the best model obtained.

4. DISCUSSION

Based on the results presented in Table 2, the best classification model was ob-tained using the dataset with 20 MFCCs + db6 and 4C, applying logistic regression with forward feature selection. This model stood out in terms of Recall and AUC, crucial metrics that provide a global measure of model performance. In comparison, studies such as that by Yunendah Nur Faudah et al. (Fuadah et al., 2023)proposed a classification model using SVM for normal and abnormal heart sounds based on different MFCCs as features, achieving a sensitivity of 0.69 and an AUC of 0.75. Similarly, Jinghui Li et al. (Liu et al., 2016) performed binary classification using SVM and Wavelet-based features, obtaining a sensitivity of 0.81. In the work by Soto-Murillo M. A. et al. (Soto-Murillo et al., 2021), binary classification was also performed using MFCC and LPC features, resulting in a sensitivity of 0.7142 and an AUC of 0.7895. However, it is important to note that these studies used balanced classes, which justifies the slightly higher performance metrics. The results obtained with hybrid models presented in this work represent a promising approach for future classification systems, especially when working with balanced class distributions.

5. CONCLUSIONS

The development of this type of machine learning models for the diagnosis of heart diseases represents a significant area of opportunity as a basis for future implementation in clinical instruments. Currently, medical devices particularly in Mexico are mostly limited to monitoring and measurement, while the aspect of assisted diagnosis remains underdeveloped, despite already being a reality worldwide.

The construction of classification models for heart sounds that incorporate both MFCC and Wavelet analysis contributes positively to the performance of the classifiers, demonstrating that the use of these two mathematical techniques is well suited for heart sound analysis.

Although this study was conducted with imbalanced classes, efficient results were obtained using MFCC and Wavelet analysis. Furthermore, through feature selection methods, efficient models were built with a reduced number of features. This is particularly relevant since, as future work, a real hardware implementation is proposed to evaluate the model's performance in real time.

Working with this type of features in a balanced environment could further improve the classifier's performance, particularly in the Recall metric, which is one of the most important for this specific problem.

ACKNOWLEDGEMENTS

Sebastian Guzman-Alfaro would like to thank the Secretariat of Science, Humanities, Technology and Innovation (SECIHTI) for the support through "National Scholarships for Postgraduate Studies 2024-2026" and the Autonomous University of Zacatecas through School of Electrical Engineering with the Center for Biomedical and Informatics Research and Innovation for the support.

REFERENCES

Ahuja, A.S. (2019). The Impact of Artificial Intelligence in Medicine on the Future Role of the Physician. *PeerJ*, 7:e7702. https://doi.org/10.7717/peerj.7702.

Gaidai, O., Cao, Y., & Loginov, S. (2023). Global Cardiovascular Diseases Death Rate Prediction. *Current Problems in Cardiology*, 48(5):101622. https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2023.101622.

De los Nietos Miguel, C. (2007). Nociones básicas de anatomía, fisiología y patología cardíaca: Bradiarritmias y Taquiarritmias. *Enfermería en Cardiología*, XVI(40):7–20.

Ballesteros, P. A. (2009). *Anatomía del Corazón*. Bilbao, España: Fundación BBVA.

Li, F., Tang, H., Shang, S., Mathiak, K., & Cong, F. (2020). Classification of Heart Sounds Using Convolutional Neural Network. *Applied Sciences*, 10(11):3956. https://doi.org/10.3390/app10113956.

Tamargo, J. (2005). *Fisiología humana* (3rd ed.). McGraw-Hill Interamericana, México.

Rubira, J. C. G. (2009). *Fisiología cardíaca*. Bilbao, España: Fundación BBVA, pp. 41–48.

Dwivedi, A. K., Imtiaz, S. A., & Rodriguez-Villegas, E. (2018). Algorithms for Automatic Analysis and Classification of Heart Sounds – A Systematic Review. *IEEE Access*, XX:1–20.

Ari, S., Kumar, P., & Saha, G. (2008). A robust heart sound segmentation algorithm for commonly occurring heart valve diseases. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 32(6):456–465.

Jacobs, W. R. (1990). Ejection Clicks. In: Walker, H. K., Hall, W. D., & Hurst, J. W. (eds.) *Clinical Methods: The History, Physical, and Laboratory Examinations*, 3rd ed. Boston, MA, USA: Butterworths.

Zeinali, Y.; Niaki, S. T. A. Heart sound classification using signal processing and machine learning algorithms. *Mach. Learn. Appl.* **2022**, *7*, 100206. https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2021.100206.

Bentley, P., Nordehn, G., Coimbra, M., Mannor, S., & Getz, R. (2016). Classifying Heart Sounds Challenge. http://www.peterjbentley.com/heartchallenge/taskoverview. Accessed 2024-09.

Bezoui, M., Elmoutaouakkil, A., & Beni-hssane, A. (2016). Feature extraction of some Quranic recitation using MFCC. In *Proc. 5th Int. Conf. on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, 127–131. IEEE. https://doi.org/10.1109/ICMCS.2016.7905619.

Reig Albiñana, D. (2015). *Implementación de Algoritmos Para la Extracción de Patrones Característicos en Sistemas de Reconocimiento de Voz en Matlab*. Ph.D. thesis, Universitat Politècnica de València.

Hubbard, B. (1999). *A Primer on Wavelets and their Scientific Applications*, CRC Press.

Kamalov, F.; Elnaffar, S.; Cherukuri, A.; Jonnalagadda, A. Forward feature selection: empirical analysis. *J. Intell. Syst. Internet Things* **2024**, *11* (1), 44–54.

Kursa, M. B.; Jankowski, A.; Rudnicki, W. R. Boruta – A System for Feature Selection. *Fundam. Inform.* **2010**, *101* (4), 271–285.

Park, H.A. (2013). An introduction to logistic regression: from basic concepts to interpretation with particular attention to nursing domain. *Journal of Korean Academy of Nursing*, 43(2), 154–164. https://doi.org/10.4040/jkan.2013.43.2.154.

Srivastava, D., & Bhambhu, L. (2010). Data classification using support vector machine. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 12, 1–7.

Miller, C., Portlock, T., Nyaga, D.M., & O'Sullivan, J.M. (2024). A review of model evaluation metrics for machine learning in genetics and genomics. *Frontiers in Bioinformatics*, 4:1457619. https://doi.org/10.3389/fbinf.2024.1457619.

Fuadah, Y.N., Pramudito, M.A., & Lim, K.M. (2023). An Optimal Approach for Heart Sound Classification Using Grid Search in Hyperparameter Optimization of Machine Learning. *Bioengineering*, 10:45. https://doi.org/10.3390/bioengineering10010045.

Liu, C., Springer, D., Li, Q., Moody, B., Juan, R.A., Chorro, F.J., *et al.* (2016). An Open Access Database for the Evaluation of Heart Sound Algorithms. *Physiological Measurement*, 37(12), 2181–2213. https://doi.org/10.1088/0967-3334/37/12/2181.

Soto-Murillo, M.A., Galván-Tejada, J.I., Galván-Tejada, C.E., Celaya-Padilla, J.M., Luna-García, H., Magallanes-Quintanar, R., Gutiérrez-García, T.A., & Gamboa-Rosales, H. (2021). Automatic Evaluation of Heart Condition According to the Sounds Emitted and Implementing Six Classification Methods. *Healthcare*, 9:317. https://doi.org/10.3390/healthcare9030317.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Evaluation of Fuzzy Systems for Soil pH Prediction in Papaya Crops

Echevarría Lezcano, Carlos David*, García Virgen, Juan*, García Díaz, Noel*, Soriano Equigua, Leonel, Ruiz Tadeo, Ana Claudia*.**

**Tecnológico Nacional de México, Campus Colima. División De Estudios de Posgrado e Investigación.*
Avenida Tecnológico No.1, Col. Liberación, Villa de Álvarez, Colima, C.P. 28976.
Teléfonos: (312) 312 6393, (312) 312 9920
***Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica*
Carretera Colima – Coquimatlán Km.9, Valle de las Huertas, 28400, Coquimatlán, Colima.
Teléfono: (312) 316 1165
(e-mail: {g2446008, jgarcia, ngarcia, aruiz} @colima.tecnm.mx, lsoriano@ucol.mx).

Abstract: This research develops a fuzzy inference system for the prediction of soil pH in papaya crops (Carica papaya L.) using soil temperature and humidity as input variables. Accurate pH prediction is essential to improve nutrient absorption, optimize fertilizer use, and enhance fruit quality, since inadequate soil conditions can cause nutrient imbalance, yield reduction, and significant economic losses. The main objective of this study is to compare the performance of the Mamdani and Takagi–Sugeno–Kang (TSK) fuzzy inference systems to determine which model provides greater accuracy in representing soil dynamics that influence papaya growth. The dataset was obtained using a Hanna GroLine probe and provided by AGROM Campos Productivos, a company specialized in the production of Passion Red papaya in Colima, Mexico. Appropriate fuzzy membership functions were defined to classify soil conditions; the Mamdani system was implemented with nine linguistic rules, achieving RMSE = 1.2326 and MMRE = 0.6842, while the TSK model used linear consequent functions, reaching RMSE = 0.0796 and MMRE = 0.3651. These results demonstrate a 93.5% improvement in RMSE and 46.6% in MMRE with the TSK approach, confirming its superior predictive accuracy and highlighting the potential of fuzzy logic as a tool to optimize soil management, increase yield, and promote sustainable precision agriculture in papaya cultivation.

Keywords: Fuzzy logic, Mamdani fuzzy system, Takagi–Sugeno–Kang system, Soil pH modeling, Papaya crops.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura constituye la base de la seguridad alimentaria y del desarrollo económico mundial. Se define como el conjunto de técnicas y conocimientos relativos al cultivo de la tierra para producir alimentos y otros bienes útiles para la humanidad (FAO, 2018). De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), alimentar a más de 9 mil millones de personas en 2050 requerirá aumentar en aproximadamente un 70% la producción agrícola global (FAO, 2021). Este panorama resalta la urgencia de implementar estrategias modernas y sostenibles que garanticen la rentabilidad y eficiencia de los sistemas de producción frente al crecimiento demográfico y los desafíos climáticos. En México, la agricultura es un sector estratégico que aporta entre el 3 y 4% del Producto Interno Bruto y genera empleo para alrededor del 13% de la población, especialmente en zonas rurales (SADER, 2023). La diversidad agroclimática nacional favorece la producción de cultivos tropicales de alto valor comercial. Particularmente, el estado de Colima se distingue por sus suelos volcánicos fértiles y clima cálido subhúmedo, condiciones que permiten la producción intensiva de frutales como plátano, mango, limón y papaya. Según el INEGI (2022), Colima produjo cerca de 187 mil toneladas de papaya, ocupando el segundo lugar nacional después de Oaxaca, consolidándose como un referente para la innovación agrícola en fruticultura tropical.

Sin embargo, la agricultura enfrenta desafíos crecientes: degradación de suelos, uso intensivo de agroquímicos y variabilidad climática. Estos retos requieren herramientas de apoyo a la toma de decisiones. En este contexto, la Inteligencia Artificial (IA) se ha convertido en un recurso estratégico. La IA se define como la disciplina que desarrolla sistemas capaces de realizar tareas que normalmente requieren inteligencia humana, como el reconocimiento de patrones, el aprendizaje y la predicción. Una de las técnicas de IA más aplicadas en la agricultura es la lógica difusa (LD), propuesta por Zadeh en 1965, que permite manejar incertidumbre mediante grados de pertenencia, a diferencia de la lógica clásica binaria (D'Negri & De Vito, 2006). Dentro de los sistemas difusos destacan el Mamdani, basado en reglas lingüísticas y con alta interpretabilidad, y el Takagi–Sugeno (TSK), cuyos consecuentes son funciones matemáticas lineales que mejoran la precisión numérica (García, 2005). Ambos enfoques resultan idóneos para modelar fenómenos agrícolas complejos como la fertilidad del suelo y la calidad de los frutos.

En la Figura 1 se observa un cultivo de papaya Passion Red, la cual es originaria de Centro y Sudamérica, dichos cultivos se han consolidado en el estado de Colima, México, gracias a empresas como AGROM ubicado en Loma Alta 1 Villa de Álvarez, Colima (19.248030337201893, -103.76786135137081), esta empresa emplea prácticas de fertirriego por goteo con soluciones nutritivas balanceadas y un sistema de monitoreo del suelo basado en sensores de pH, temperatura y humedad.

Fig. 1. Cultivo de Papaya de AGROM

Estos parámetros son esenciales porque determinan la disponibilidad de nutrientes, la eficiencia de absorción y, en consecuencia, el rendimiento y calidad del fruto. La elección del pH del suelo como variable objetivo es clave, ya que regula la solubilidad de macro y micronutrientes (Xu et al., 2024). Los niveles de pH en cultivos de papaya oscilan entre 5.5 y 7.0, teniendo como clasificación ácido, neutro y alcalino, tal como se puede apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1. Niveles de pH cultivo de papaya.

Variable	Ácido	Neutro	Alcalino
pH	<5.5	5.5-7.0	>7.0

Mantener el pH en un rango óptimo favorece la absorción de fósforo, potasio y calcio, fundamentales en el desarrollo de papaya. Tanto la temperatura como la humedad del suelo son variables determinantes, pues afectan los procesos químicos y biológicos que regulan la estabilidad del pH.

En los últimos cinco años, diversos estudios han aplicado LD para la predicción de parámetros edáficos y de calidad de cultivos. Magalhães et al. (2022) desarrollaron un sistema difuso para pronosticar la evolución de parámetros fisicoquímicos en duraznos, identificando el momento óptimo de comercialización. A su vez Khumaidi et al. (2022) emplearon espectroscopía NIR y un modelo Mamdani para clasificar el grado de madurez del mango con una precisión del 95.7%. Por su parte en Nassiri et al. (2022) aplicaron LD y visión artificial para clasificar tomates según su madurez, con una exactitud cercana al 90%. Además, en Rahmadany et al. (2023) desarrollaron un sistema difuso para clasificar la madurez de papaya mediante análisis de color, alcanzando una precisión superior al 93%. De forma más reciente, Gutiérrez-Magaña et al. (2024) compararon modelos difusos Mamdani y Takagi-Sugeno en cultivos de Stevia rebaudiana, encontrando que el modelo TSK redujo el error hasta en un 70% respecto al Mamdani y mostrando una mayor capacidad de adaptación para determinar el momento óptimo de cosecha en condiciones reales de campo. Por último, en Sunori et al. (2021) construyeron un modelo difuso para predecir el pH del suelo integrando variables como humedad, temperatura y nutrientes, demostrando la robustez del enfoque ante la variabilidad ambiental. Finalmente, estos estudios evidencian que la LD, en sus variantes Mamdani y TSK, representan una herramienta versátil y efectiva para modelar la complejidad de los sistemas agrícolas, justificando su aplicación en la predicción del pH del suelo en el rancho Loma Alta ubicado en el estado de Colima. Este trabajo de investigación tiene como objetivo comparar el desempeño de los sistemas de inferencia difusa Mamdani y Takagi–Sugeno–Kang en la predicción del pH del suelo aplicado al cultivo de papaya, con el propósito de determinar el modelo más preciso y eficiente para evaluar la calidad del suelo. Anticipar variaciones en el pH del suelo permite ajustar oportunamente las prácticas de fertilización, riego y corrección de acidez o alcalinidad, evitando pérdidas económicas derivadas de un manejo inadecuado del suelo y promoviendo un uso más racional y sustentable de los recursos agrícolas.

La comparación entre los sistemas Mamdani y TSK se justifica en la necesidad de identificar el enfoque de inferencia más robusto y generalizable para este tipo de aplicaciones, considerando que, tras una revisión exhaustiva de la literatura, no se encontraron estudios previos que apliquen modelos de lógica difusa en la predicción del pH específicamente para cultivos de papaya. Finalmente, los resultados obtenidos ofrecen una referencia metodológica para futuras investigaciones, que podrían integrar tecnologías IoT, sensores de bajo costo, redes neuronales o modelos híbridos difusos-neuronales, orientadas a automatizar la predicción de parámetros edáficos y contribuir al avance de la agricultura de precisión en cultivos tropicales.

2. METODOLOGÍA

La LD se ha convertido en una herramienta clave dentro de la IA aplicada a la agricultura. Su mayor fortaleza radica en la capacidad de representar fenómenos reales que son inherentemente complejos, imprecisos o variables, como ocurre con la dinámica de los suelos (Singh et al., 2021). A diferencia de los modelos tradicionales, que exigen fórmulas rígidas y relaciones estrictamente lineales, la LD trabaja con funciones de pertenencia y reglas lingüísticas que imitan la forma en que los humanos razonan y toman decisiones.

Dentro de los sistemas de inferencia difusa (SID), los dos enfoques más utilizados son el Mamdani y el TSK. El sistema Mamdani es valorado principalmente por su interpretabilidad, ya que se basa en reglas del tipo “SI–ENTONCES”, expresadas con términos lingüísticos como bajo, medio o alto (Ullah et al., 2023). Estas reglas generan una salida difusa que debe transformarse en un valor numérico mediante un proceso

de defuzzificación, siendo el método del centroide el más utilizado, la principal característica de este sistema es que en su salida utiliza funciones de membresía. En la figura 2 se muestra una representación gráfica del SID tipo Mamdani, con sus dos variables de entrada (humedad y temperatura) y su variable de salida (pH).

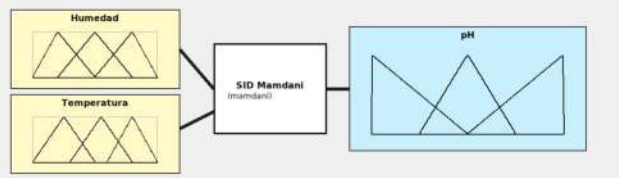


Fig. 2. SID Mamdani

El modelo TSK, en cambio, introduce un matiz distinto: sus consecuentes no son etiquetas lingüísticas, sino valores numéricos o expresiones lineales de las variables de entrada (Johri et al., 2024), como se observa en Figura 3. Esta diferencia le permite alcanzar una mayor precisión numérica en problemas de predicción, aunque sacrifica parte de la claridad interpretativa que ofrece el Mamdani.

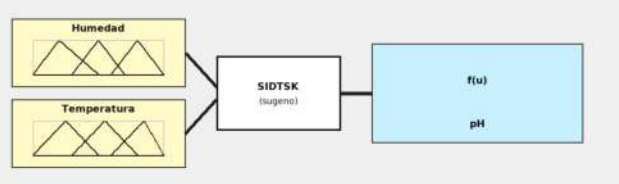


Fig. 3. SID Takagi–Sugeno

En este trabajo se implementaron ambos SID con un objetivo concreto: comparar los dos SID y determinar quién tiene mayor precisión en su predicción del pH del suelo en cultivos de Carica papaya L., variedad Passion Red, empleando como variables independientes la temperatura y la humedad del suelo.

2.1 Dataset

El estudio se desarrolló en el predio Loma Alta 1, ubicado en Colima, México, administrado por la empresa AGROM Campos Productivos, dedicada a la producción y comercialización de papaya Passion Red. El sistema de riego utilizado proviene de un pozo profundo, cuya calidad fue evaluada con un medidor tipo sonda, Hanna GroLine (Figura 4), introducido a la profundidad de interés.

Fig. 4. Medidor tipo sonda Hanna GroLine

El conjunto de datos utilizado en esta investigación se compuso de 1,200 registros únicos, que incluyen las variables de estudio en este trabajo, las cuales fueron registradas mediante un sistema de monitoreo implementado directamente en el campo. Los datos se obtuvieron con ciclos de 4 horas (3 veces al día, de 7:00 am a 7:00 pm) monitoreando el pH del suelo, la humedad y la temperatura.

El análisis del suelo reveló un pH de 7.70, así como concentraciones muy bajas de micronutrientes como hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu) y boro (B). Estos resultados confirmaron que el agua es apta para el cultivo de papaya, aunque hacen necesario un manejo nutrimental complementario para cubrir las deficiencias de micronutrientes.

La Figura 5 muestra la distribución tridimensional de los datos experimentales, donde se representa la relación entre la temperatura del suelo, la humedad y el pH medido. Cada punto corresponde a un registro obtenido en campo, y la escala de color indica el valor de pH (Ver Tabla 1). Se observa un comportamiento claro en el que los valores de pH tienden a incrementarse conforme aumenta la humedad del suelo, especialmente en rangos entre 60 - 90 %, mientras que temperaturas más elevadas (por arriba de 30 °C) se relacionan con valores de pH más bajos o ligeramente ácidos. Esta visualización permite comprender de forma intuitiva la dinámica edáfica del cultivo y justifica la selección de la temperatura y la humedad como variables de entrada para los modelos difusos.

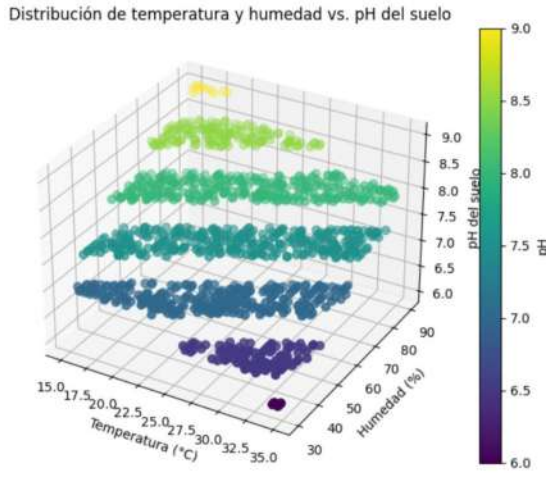


Fig. 5. Distribución de temperatura - humedad y PH

2.2. Variables de los SID

Las variables seleccionadas para construir los SID Mamdani y TSK fueron la temperatura, la humedad del suelo y el pH.

2.2.1 Variables independientes (entradas)

Temperatura del suelo (°C): rango de 15 a 35 °C, representando condiciones bajas, medias y altas propias de un clima tropical.

Humedad del suelo (%): rango de 30 a 90 %, cubriendo desde suelos relativamente secos hasta condiciones cercanas a la saturación.

2.2.2 Variable dependiente (salida)

pH del suelo: clasificado en tres categorías según criterios agronómicos que se muestran en la Tabla 1. *2.3 Funciones de membresía (FM).*

Para traducir los valores numéricos a términos lingüísticos, se emplearon tres tipos de funciones de membresía (FM): triangulares, trapezoidales y gaussianas. Las FM triangulares se caracterizan por su simplicidad y facilidad de ajuste a los rangos observados, mientras que las trapezoidales y gaussianas permiten representar transiciones más suaves entre categorías (García-Díaz et al., 2013).

Con el objetivo de seleccionar el tipo de FM a emplear en los SID, se procedió a realizar los cálculos con los 3 tipos de FM mencionados, siendo evaluados con las métricas MMRE y RMSE, tal como se muestra en la Tabla 2, la FM del tipo triangular presentó los mejores valores de MMRE y RMSE. Destacando que estas dos métricas miden el error, por lo que valores cercanos a cero son mejores en su precisión.

Tabla 2. Desempeño comparativo de las funciones de membresía

	Triangulares	Trapezoidales	Gaussianas
MMRE	0.684	0.697	0.72
RMSE	1.232	1.241	1.246

A continuación, se muestran los parámetros de las FM tipo triangular, que fueron obtenidas en consulta con el productor de la empresa y con el conjunto de datos mencionados en la sección 2.1.

- Temperatura: baja [15, 17.5, 23], media [20, 25, 30], alta [27, 32, 35].
- Humedad: baja [30, 40, 55], media [50, 60, 70], alta [65, 77, 90].
- Salida (pH): ácido [4, 4, 5.5], neutro [5.5, 6.25, 7.0], alcalino [7.0, 8, 8].

2.4 Reglas difusas

Las reglas difusas constituyen el núcleo de los sistemas de inferencia, al definir la relación entre entradas y salidas. En este estudio se utilizó una base de 9 reglas, que cubre todas las combinaciones entre niveles de temperatura y humedad. Las reglas difusas del modelo se definieron combinando la revisión de la literatura científica con la experiencia práctica del agricultor. Así, se integraron los patrones aceptados en el manejo de suelos con el conocimiento del contexto local del cultivo. Esta configuración mostró un menor error de predicción que un sistema de seis reglas, por lo que se justifica su adopción en función de la cobertura completa y del mejor desempeño obtenido:

1. SI temperatura es baja Y humedad es baja, ENTONCES pH es neutro.
2. SI temperatura es baja Y humedad es media, ENTONCES pH es neutro.
3. SI temperatura es baja Y humedad es alta, ENTONCES pH es ácido.
4. SI temperatura es media Y humedad es baja, ENTONCES pH es alcalino.
5. SI temperatura es media Y humedad es media, ENTONCES pH es neutro.
6. SI temperatura es media Y humedad es alta, ENTONCES pH es ácido.
7. SI temperatura es alta Y humedad es baja, ENTONCES pH es alcalino.
8. SI temperatura es alta Y humedad es media, ENTONCES pH es alcalino.
9. SI temperatura es alta Y humedad es alta, ENTONCES pH es neutro.

2.5 Función de Inferencia Takagi–Sugeno

En el modelo Takagi–Sugeno–Kang (TSK), cada regla difusa define una relación lineal entre las variables de entrada — temperatura (T) y humedad (H)— y la variable de salida, que en este caso es el pH del suelo. En este estudio, el comportamiento global del sistema se modeló mediante una función lineal (variable de salida) simplificada, derivada de la tendencia empírica observada en los datos experimentales mostrados en la Figura 5. Las FM empleadas para las variables de entrada y la expresión lineal del modelo TSK se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Funciones del SID TSK.

Variable	Etiqueta	Tipo de función	Parámetros
Temperatura °C	Baja	Triangular	[15, 17.5, 23]
	Media	Triangular	[20, 25, 30]
	Alta	Triangular	[27, 32, 35]
Humedad %	Baja	Triangular	[30, 40, 55]
	Media	Triangular	[50, 60, 70]
	Alta	Triangular	[65, 77, 90]
pH	Función de TSK	Lineal	*ph = 0.05T+0.03H*

En la función de salida del sistema TSK los coeficientes de $a_0 = 7$, $a_1 = -0.05$ y $a_2 = 0.03$ representan los coeficientes que describen la dependencia lineal del pH con respecto a la temperatura y la humedad del suelo. Esta formulación captura la relación inversa entre la temperatura y el pH, así como la relación directa entre la humedad y el pH, de acuerdo con la distribución mostrada en la Figura 4. Además, mantiene la interpretabilidad del modelo.

2.5 Métricas de Evaluación

Para la evaluación del desempeño de los modelos difusos se emplearon dos métricas principales: el Error Relativo Medio (MRE) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), lo que permitió valorar tanto la capacidad de clasificación como la precisión numérica de las predicciones de pH [16].

La fórmula del MRE se expresa como se observa en la Ec. 2:

$$\text{MRE} = \frac{|Actual\ Predicion_i - Estimated\ Predicion_i|}{Actual\ Predicion_i} (2)$$

La media de las n observaciones de MRE es calculado como sigue en la Ec. 3:

$$\text{MMRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} MRE_i \quad (3)$$

El MMRE arroja una medida del error relativo promedio respecto a los valores reales, indicando en qué proporción el modelo se desvía de los datos observados, como referencia un valor considerado como aceptable para modelos predictivos utilizando MMRE $\leq$ 0.25 es considerado como aceptable (Conte, 1986).

La fórmula del RMSE se define como se observa en Ec. 3:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (Estimated\ Prediction_i - Actual\ Prediction_i)^2}{n}} (3)$$

El RMSE cuantifica la magnitud promedio del error en las predicciones, penalizando con mayor peso las desviaciones grandes. En conjunto, el MMRE refleja la eficiencia del modelo en términos relativos, mientras que el RMSE muestra la precisión numérica absoluta de las predicciones de pH, permitiendo una evaluación integral de los sistemas difusos propuestos.

Adicionalmente, para fortalecer la validación del modelo, se incorporó el coeficiente de determinación (r^2) reconocido como una de las métricas más empleadas en la evaluación de modelos predictivos (De Vos et al., 2021; Mauri et al., 2021; Parra et al., 2019; Sánchez et al., 2020). Este indicador expresa el grado en que la variabilidad de la variable dependiente puede ser explicada por las variables independientes, proporcionando una medida directa de la calidad del ajuste del modelo. Además, el r^2 resulta útil para examinar la relación lineal entre los valores observados y los estimados, así como para comparar la consistencia entre distintos modelos (Vejar-Cortés et al., 2023). Sus valores se sitúan en un rango de 0 a 1, donde valores próximos a 0 reflejan una débil relación lineal y aquellos cercanos a 1 evidencian una correlación casi perfecta (Chicco et al., 2021; De Vos et al., 2021). De forma general, se considera que un coeficiente r^2 mayor a 0.5 indica un nivel aceptable de ajuste estadístico y una representación adecuada de la relación entre las variables (Chin, 1998; Humphrey, 1995).

Además, se empleó el método de validación cruzada Hold-out el cual es una estrategia de validación ampliamente utilizada en aprendizaje automático, que consiste en dividir el conjunto de datos en dos subconjuntos: uno destinado al entrenamiento del modelo y otro para su validación (Nurhayati et al., 2014). En este estudio se consideraron diferentes esquemas de partición, como 90/10, 80/20 y 70/30, donde el primer valor corresponde al porcentaje de datos empleados para el entrenamiento y el segundo al porcentaje destinado a la prueba del modelo.

De acuerdo con la literatura especializada en aplicaciones agrícolas, la división 80/20 representa un equilibrio adecuado entre la cantidad de información disponible para el entrenamiento y la robustez en la evaluación del modelo, permitiendo obtener predicciones más estables y confiables en comparación con otras particiones. Por esta razón, la validación de los sistemas difusos Mamdani y TSK en este trabajo se llevó a cabo utilizando este esquema, reservando el 80% de los registros para entrenamiento y el 20% para validación. Ambos modelos fueron implementados en Python utilizando la librería scikit-fuzzy dentro del entorno Google Colab.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

El sistema difuso Mamdani, estructurado a partir de las reglas basadas en las combinaciones de temperatura y humedad del suelo, presentó limitaciones en la predicción del pH. La evaluación arrojó un RMSE de 1.2329 y un MMRE de 0.6842 en su validación de los modelos, valores que reflejan una dispersión elevada respecto a los valores de referencia. De manera complementaria, el coeficiente de determinación (r^2 = 0.5638) indicó que el modelo únicamente explica alrededor del

56 % de la variabilidad observada en los datos experimentales de pH, lo cual confirma un ajuste estadísticamente aceptable, pero limitado en términos predictivos.

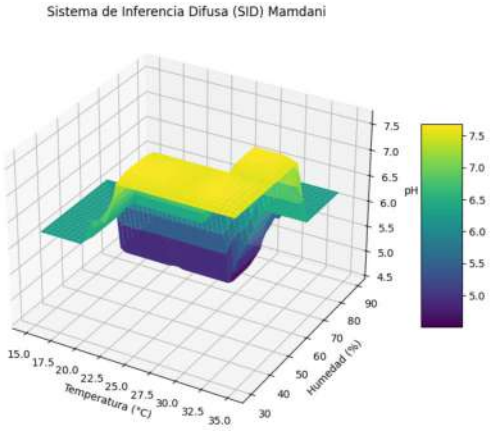


Fig. 6. Modelado del SID Mamdani

En la Figura 6 se aprecia la superficie generada por el SID Mamdani, la cual presenta zonas planas y transiciones abruptas, este desempeño evidencia que, aunque el modelo logra capturar parcialmente las relaciones entre las variables, su capacidad de generalización resulta restringida debido a la superposición de FM y a la complejidad no lineal del fenómeno.

3.1 Evaluación del sistema Takagi–Sugeno (TSK)

En contraste, el modelo TSK, al utilizar reglas con salidas numéricas en lugar de etiquetas lingüísticas, este SID logró representar con mayor precisión un comportamiento significativamente más robusto. Los resultados indican un RMSE de 0.3651 y un MMRE de 0.0796, resultados estadísticamente superiores en su precisión a los obtenidos con Mamdani. Asimismo, el valor de r^2 = 0.9408 indica que el modelo logra explicar aproximadamente el 94 % de la variabilidad de los datos observados, lo que refleja una alta capacidad de ajuste y generalización.

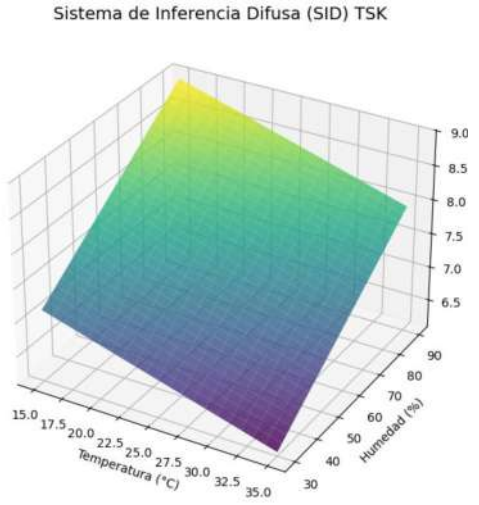


Fig. 7. Modelado del SID TSK

La Figura 7 ilustra la superficie generada por el sistema TSK, donde se observa una transición suave y continua en la predicción del pH, reflejando la naturaleza gradual de los procesos físico-químicos del suelo. Este resultado confirma que el SID TSK ofrece una aproximación más cercana a los valores reales de pH, con errores relativos reducidos y una mayor coherencia en la representación del fenómeno.

3.2 Comparación de SID

La comparación de ambas metodologías permite concluir que el SID TSK superó de manera notable al SID Mamdani en las métricas consideradas. Mientras que el Mamdani se caracterizó por una mayor interpretabilidad, pero una baja exactitud en la estimación, el TSK alcanzó un balance más favorable entre simplicidad de reglas y precisión numérica. Estos hallazgos coinciden con lo reportado en la literatura, donde los sistemas TSK suelen mostrar un mejor desempeño en la predicción de variables continuas, aunque con menor transparencia que los sistemas Mamdani.

A continuación se presentan los resultados comparativos de ambos modelos en donde claramente el SID TSK es superior con ambas métricas al SID Mamdani.

Tabla 3. Desempeño comparativo de los modelos difusos en la predicción del pH

Modelo	RMSE	MMRE	r^2
Mamdani	1.2326	0.6842	0.5638
TSK	0.3651	0.0796	0.9408

La Tabla 3 muestra que el SID TSK reduce el error absoluto y relativo de manera considerable frente al Mamdani, consolidándose como la opción más adecuada para la predicción del pH en cultivos de papaya bajo las condiciones evaluadas.

4. CONCLUSIONES

Este estudio mostró cómo la LD puede convertirse en una aliada para entender y anticipar el comportamiento del suelo en cultivos de papaya, particularmente en lo que respecta al pH. De acuerdo a los resultados obtenidos el SID TSK (0.0796) superó ampliamente al SID Mamdani (MMRE = 0.6842), utilizando el resultado obtenido de MMRE, este SID predictivo se considera aceptable debido a que su error es menor o igual a 0.25 por otro lado, este resultado brindará un mayor beneficio al agricultor al reducir las pérdidas y costos en el cultivo, por el contrario, esto generará un aumento de calidad en la fruta.

Como trabajo futuro, se plantea la mejora e implementación innovadora del SID, explorando la aplicación de técnicas metaheurísticas para el ajuste automático de las FM y la optimización de las reglas del sistema, con el fin de incrementar su rendimiento predictivo y robustez. Asimismo,

se integrarán nuevas variables relevantes para la calidad del suelo, como la conductividad eléctrica y las concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio, lo que permitirá una representación más completa de las condiciones edáficas. Finalmente, se prevé el desarrollo de una plataforma web interactiva que muestre los valores obtenidos en tiempo real, ofreciendo al productor agrícola una herramienta accesible y práctica para la toma de decisiones en el manejo de suelos y cultivos.

REFERENCIAS

Chicco, D., Warrens, M.J. and Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R^2 and adjusted R^2 in regression models. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 564, 125351.

Chin, W.W. (1998). The partial least squares approach to structural equation modeling. In Marcoulides, G.A. (ed.) Modern methods for business research, pp. 295–336. Lawrence Erlbaum Associates.

Conte, S.D., Dunsmore, H.E. and Shen, V.Y. (1986). Software engineering metrics and models. Benjamin-Cummings Publishing Co., Menlo Park, CA.

D'Negri, C. and De Vito, E. (2006). Introducción al razonamiento aproximado: lógica difusa. Revista Americana de Medicina Respiratoria, 6(4), 157-164.

De Vos, M., Gautam, D. and De Corte, W. (2021). Evaluating regression models using R^2 and RMSE: Practical considerations for environmental data. Environmental Modelling & Software, 145, 105198.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2018). The future of food and agriculture: alternative pathways to 2050. FAO, Rome.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2021). How to feed the world in 2050. FAO, Rome.

García, B. (2005). Sistemas neuro-difusos aplicados al control automático. Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena.

García-Díaz, N., López-Martín, C. and Chavoya, A. (2013). A comparative study of two fuzzy logic models for software development effort estimation. Procedia Technology, 7, 305-314.

Gutiérrez-Magaña, S.M., García-Díaz, N., García-Virgen, J., Ruiz-Tadeo, A.C., Brizuela-Ramírez, J.E. and Soriano-Equigua, L. (2024). Comparación de modelos difusos para predecir la cosecha oportuna en cultivos de Stevia. Revista ELECTRO, 46, 239-246.

Humphrey, J.D. (1995). Mechanics of the arterial wall: Review and directions. Critical Reviews in Biomedical Engineering, 23(1–2), pp.1–162

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2022). Anuario estadístico y geográfico de Colima 2022. INEGI, Aguascalientes.

Johri, M., Mangal, Y., Parashar, N., Ashish, A. and Kumud. (2024). Optimizing crop yield prediction using machine learning and deep learning approaches. In Proceedings of the 7th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), pp. 1-5. IEEE, Piscataway, NJ.

Khumaidi, M., Tjahjono, T. and Susanto, A. (2022). Prediction of mango maturity using near-infrared spectroscopy and fuzzy logic. Agronomy, 12(3), 648.

Magalhães, M., Machado, A.R. and Cruz, M.A. (2022). Decision support system for peach fruit shelf-life prediction using fuzzy logic. Computers and Electronics in Agriculture, 198, 106886.

Mauri, A., Bianchi, A. and Ceri, S. (2021). Regression model validation in complex data environments. Information Systems, 100, 101720.

Nassiri, R., Razzaghi, F. and Omid, H. (2022). Tomato ripeness classification using fuzzy logic and machine vision. Journal of Food Engineering, 315, 110789.

Nurhayati, N., Soekarno, I., Hadihardaja, I.K. and Cahyono, M. (2014). A study of hold-out and k-fold cross validation for accuracy of groundwater modeling in tidal lowland reclamation using extreme learning machine. In Proceedings of the 2nd International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering & Environment (TIME-E), pp. 228-233. IEEE, Piscataway, NJ.

Parra, R., Medina, J. and Cabrera, M. (2019). Assessment of fuzzy logic models in environmental prediction systems. Applied Soft Computing, 82, 105543.

Rahmadany, R., Wahyudi, S. and Hartono, M. (2023). Development of a fuzzy logic-based papaya ripeness detection system using image processing. Telkomnika (Telecommunication, Computing, Electronics and Control), 21(1), 73-80.

Sánchez, D., López, F. and Torres, M. (2020). Performance evaluation of fuzzy systems using R^2 metrics in agricultural datasets. Computers and Electronics in Agriculture, 175, 105620.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) (2023). Agricultura en cifras. Gobierno de México, Mexico City.

Sepúlveda, Y. (2020). Artificial intelligence (AI) and its applications in modern agriculture. [online] Available at: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17264.89603 [Accessed 23 September 2025].

Singh, A., Meena, K. and Kumar, V. (2021). Fuzzy inference system for soil fertility evaluation and crop recommendation. Computers and Electronics in Agriculture, 192, 106523.

Sunori, A., Saini, R. and Gupta, P. (2021). Soil pH prediction using fuzzy logic and machine learning techniques. Materials Today: Proceedings, 51, 25-31.

Ullah, A., Bin, L., Shahzad, M., Khan, H., Bashir, M.M. and Siddique, M. (2023). Sustainable smart agriculture farming for cotton crop: A fuzzy logic rule-based methodology. Sustainability, 15(18), 13874.

Vejar-Cortés, A.-P., García-Díaz, N., Soriano-Equigua, L., Ruiz-Tadeo, A.-C. and Álvarez-Flores, J.-L. (2023). Determination of crop soil quality for Stevia rebaudiana Bertoni Morita II using a fuzzy logic model and a wireless sensor network. Applied Sciences, 13(17), 9507. https://doi.org/10.3390/app13179507

Xu, X. et al. (2024). Identification of geographic, climatic, and soil factors dominating Stevia rebaudiana yield and quality. Journal of Agricultural Science, 166(5), 782-791.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Intelligent Models for Predicting Phonological Development

Maria Herlinda Castillo Hernández*, Blanca Estela Pedroza Méndez, Yesenia Nohemí González Meneses*****

Tecnológico Nacional de México/Apizaco, Av. Instituto Tecnológico s/n. Conurbado Tzompantepec, 90300, Apizaco, Tlaxcala.
México (e-mail: m23370039@apizaco.tecnm.mx, blanca.pm@apizaco.tecnm.mx**, depi_msc@apizaco.tecnm.mx***).*

Abstract: Childhood phonological development is a key indicator of cognitive and linguistic progress during childhood. Correct articulation of sounds and progressive vocabulary acquisition allow for the identification of age-appropriate speech maturation and the timely detection of possible disorders. This study evaluated 87 children between the ages of 3.6 and 6 years using tasks from the Revised Phonetic-Phonological Evaluation Protocol (PEFF-R) to determine whether they had reached the expected level for their age and to explore automatic prediction of pronunciation. To this end, two artificial intelligence models were implemented: a Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) network and a Bidirectional Associative Memory (BAM) network. The results show that BiLSTM achieved solid performance in identifying phonological patterns and predicting expected productions, while BAM, although limited in overall accuracy, proved useful in categorizing phonological errors (omissions, substitutions, and distortions), while also presenting restrictions when processing long association sequences.

Keywords: Phonological development, intelligent models, phoneme, BiLSTM, BAM

1. INTRODUCCIÓN

El habla es un proceso que integra la producción y la percepción de sonidos, para que se lleve a cabo de manera adecuada, las estructuras articulatorias deben estar en la posición y función correcta (Susanibar et al., 2016). En la infancia, las dificultades de articulación o alteraciones en la producción del habla incrementan el riesgo de presentar limitaciones en el aprendizaje, interacciones sociales y una disminución de la autoestima (Cuesta & Barrera, 2022). Para ello, se requiere una evaluación que permita determinar los errores presentes en su habla y valorar si corresponden o no al nivel esperado respecto a su edad.

De acuerdo al PEFF-R, el fonema constituye la unidad sonora perceptible más pequeña que diferencia palabras dentro de una lengua (Malakar & Keskar, 2021). Cualquier omisión, sustitución o alteración en la posición de un fonema se traduce en una modificación de la palabra, fenómeno que puede indicar una desviación en el Desarrollo Fonológico (DF).

El DF está condicionado por múltiples factores, nivel socioeconómico, el idioma, país, el entorno sociocultural y el medio en el que interactúa el niño (Alás et al., 2022). No obstante, en este estudio se consideran específicamente dos variables centrales: la edad cronológica y los fonemas producidos**,** en relación con las formas esperadas en el PEFF-R.

Para el proceso metodológico se planteó el uso de los modelos inteligentes: la red BAM, orientada a establecer la relación entre palabras base y palabras pronunciadas, y la red BiLSTM**,** diseñada para analizar patrones secuenciales. La integración de estos enfoques busca ofrecer una metodología objetiva y escalable que permita predecir e identificar errores fonológicos (omisiones, sustituciones y distorsiones) y estimar la presencia o ausencia de alteraciones en la producción de la palabra.

2. FONÉTICA Y FONOLOGÍA

La fonética y la fonología son disciplinas que estudian los sonidos del habla (SH). La fonética se ocupa de las características articulatorias y acústicas de los sonidos, mientras que la fonología determina qué rasgos son relevantes para distinguir significados en una lengua (Susanibar et al., 2016), ambas estudian las características, complejidad, comportamientos y organización de los SH de una lengua en la producción de la palabra.

2.1 La fonética

La fonética está relacionada al estudio de los SH en relación con sus particularidades articulatorias, acústicas y perceptuales (Perea, 2024). Estudios en el área de la fonética han evidenciado que los hablantes pueden adaptar sus producciones, llegando a generar distorsión, que es un error en la articulación del sonido, donde el sonido generado no sigue los patrones del idioma del hablante, siendo considerada una

alteración fonética. La fonética reúne los sonidos en dos grupos: consonantes y vocales (Susanibar et al., 2016).

2.2 Fonología

En la fonología, la unidad básica es el fonema, que puede entenderse como una representación mental de los sonidos que forman parte de una lengua (Malakar and Keskar, 2021), estos sonidos se llaman contrastivos porque hacen posible distinguir significados; por ejemplo, "tasa" y "masa" difieren solo en el primer sonido (/t/ y /m/), pero esa mínima variación cambia por completo el sentido de la palabra. Para que esto ocurra, interviene la percepción fonológica, que es la capacidad de reconocer y diferenciar los SH (Cervera and Ygual, 2001). A su vez, la discriminación fonológica consiste en poder distinguir un sonido de otro al compararlos y decidir si son iguales o diferentes, lo que permite al niño no solo escuchar, sino también identificar y comprender los sonidos de su idioma, sin que este tenga una alteración o una simplificación fonológica que pueda confundir al oyente con relación al contexto de la conversación.

2.3 Procesos de simplificación fonológica

Los Procesos de Simplificación Fonológica (PSF), también llamados procesos naturales, son patrones que aparecen de manera natural regularmente en el habla infantil, es decir, cuando el niño aún no ha desarrollado plenamente sus capacidades neuromusculares y lingüísticas, tiende a reemplazar sonidos o secuencias difíciles por otros más simples, que le resultan más fáciles de articular. Por ejemplo, un niño puede decir "ten" en lugar de "tren", omitiendo o sustituyendo sonidos que todavía no domina, estos procesos no son considerados anormales en la primera etapa de la infancia, ya que forman parte del desarrollo natural del habla, con el tiempo, y conforme el niño va madurando sus habilidades lingüísticas, los PSF van desapareciendo de manera progresiva, hasta que su producción oral se asemeja a la de un adulto, sin embargo cuando esta maduración no se logra en una edad esperada se puede considerar que se tiene una alteración en la adquisición y desarrollo fonético-fonológico (ADFF).

2.4 Alteraciones en la adquisición y desarrollo fonético-fonológico

Dentro de la ADFF, se encuentra el trastorno del habla, el cual se define como el uso impreciso o débil que presenta el niño para la estructura fonética- fonológica determinada en una lengua, debido a alteraciones en los procesos neurolingüísticos, neurofisiológicos, neuromusculares y/o actividad psíquica relacionadas con ella (Susanibar et al., 2016). En la tabla 1, se presenta una comparativa de los sonidos esperados respecto a la edad donde se llega a la coincidencia, que para determinar un DH con respecto a la edad debe considerarse un dominio del 90% antes de los 7 años (Melgar de González, 1976), (Bosch, 2004), (Vivar and León, 2009), (Susanibar, Condori and Dioses, 2013).

Tabla 1. Edades propuestas en la adquisición de los sonidos del habla en español

Modo articulatorio	3 años	4 años	5 años	6 años	7 años
Africada [tʃ]	92%	90%			
Diptongos [ei], [au], [ie], [ue], [ua], [ui]	80%	90%			
	73%	85%			
	60%	90%			
Fricativas [f], [s], [x]	82%				
	90%				
	80%	90%	100%		
	92%				
	97%				
Grupos consonánticos [br], [fr], [pr], [cr], [gr], [dr], [tr], [r], [pl], [fl], [cl], [bl], [gl]	60%	80%	80%	90%	
	70%	90%			
Laterales [l]	80%	85%	90%	90%	
	97%				90%
Nasales [m], [n]	100%				
Oclusivas sonoras [p], [t], [k], [b], [d], [g]	90%	95%	100%		
	90%	95%	100%		
	95%				
Oclusivas sordas [p], [t], [k]	90%	95%	100%		
	100%				
Vibrantes [r]	47%	75%	90%		
	50%	70%	70%	80%	90%

2.5 Modelos inteligentes

Los modelos inteligentes constituyen un conjunto de técnicas basadas en IA capaces de aprender, representar y generalizar patrones a partir de datos. En el ámbito de la fonética y la fonología, los modelos inteligentes facilitan el reconocimiento, la clasificación y la predicción de fenómenos fonológicos a partir de muestras reales, lo que los posiciona como un recurso tecnológico para la evaluación del DF infantil. Para este estudio se emplean dos enfoques complementarios: BAM Y BiLSTM.

2.5.1 Bidirectional Associative Memory

Bidirectional Associative Memory (por sus siglas en inglés, BAM) es una red neuronal recurrente propuesta por Kosko en 1988, basada en la asociación bidireccional de patrones. Su función principal es almacenar y recuperar pares de datos, de modo que un estímulo de entrada pueda evocar el correspondiente patrón de salida, y viceversa. (Olabe, 2008).

2.5.2 *Bidirectional Long Short-Term Memory*

Long Short-Term Memory (LSTM, por sus siglas en inglés), procesan únicamente en una dirección (del pasado hacia el futuro), lo que restringe su acceso al contexto futuro de la secuencia (Hochreiter and Schmidhuber, 1997), para superar esta limitación, la BiLSTM incorpora dos capas ocultas, una capa forward, que transmite información del pasado hacia el futuro, y una capa backward, que transmite información del futuro hacia el pasado (Fan et al., 2024).

3 METODOLOGÍA

La metodología de este estudio se diseñó, para analizar el DF infantil a partir de datos reales obtenidos en un contexto escolar controlado. El proceso se estructuró en varias etapas secuenciales que abarcan desde la recolección y organización de las muestras de voz, hasta su análisis mediante modelos inteligentes.

3.1 Protocolo de Evaluación Fonética-Fonológica-Revisado

El PEFF-R se empleó como instrumento base para la evaluación, ya que contempla diferentes tareas que permiten analizar tanto la capacidad articulatoria como la fonológica del niño. Entre dichas tareas, se incluye la repetición de sílabas, dirigida a valorar la precisión en la producción fonética; la repetición de palabras bisílabas y trisílabas, que evalúa la capacidad fonética y fonológica al presentar sonidos en distintas posiciones silábicas: Inicio Silábico al Principio de la Palabra (ISPP), Inicio Silábico en el Interior de la Palabra (ISIP), Coda Silábica en el Interior de la Palabra (CSIP) y Coda Silábica al Final de la Palabra (CSFP); y finalmente la denominación de imágenes, donde el niño debe nombrar las figuras presentadas en láminas, lo que permite registrar de manera natural la producción de fonemas en contexto.

3.2 Etapas del proceso metodológico

El flujo metodológico de este estudio (Fig. 1), cuenta con ocho módulos principales que reflejan de manera secuencial la ruta seguida desde la recolección de datos hasta el análisis del DF. Cada módulo hace referencia a una etapa específica del procedimiento: la entrada y colección de la voz infantil, el procesamiento y validación de las señales obtenidas, la clasificación de los errores fonológicos, la organización de los datos resultantes y, finalmente, la aplicación de modelos inteligentes (BiLSTM y BAM).

Figura 1. Flujo metodológico para el análisis y evaluación del desarrollo fonológico

A continuación, se describen las acciones de cada uno de los módulos.

1. E*ntrada de voz*, En este módulo los niños producen palabras propuestas en el PEFF-R**.**
2. *Colección de señal de voz*. Las producciones se graban y almacenan en archivos de audio + hoja de cálculo.
3. *Procesamiento de señal.* se aplican depuraciones para garantizar uniformidad:
   - Limpieza (recorte de silencios, atenuación de ruido).
   - Normalización/estandarización (frecuencia de muestreo y nivel a 16 lups).
   - Segmentación por palabra
4. *Métricas de evaluación*. Se lleva a cabo el control de calidad de las grabaciones y similitud voz-texto o fonema-fonema.

5. *Clasificador de errores*. Sobre cada par *(palabra base, palabra pronunciada),* se etiqueta el tipo de error conforme a PEFF-R: omisión, sustitución o distorsión. El clasificador:
   1. Localiza el fonema objetivo,
   2. Establece la posición silábica (ISPP, ISIP, CSIP, CSFP) y
   3. Decide la etiqueta de error o sin error.

   El diagrama de flujo (Fig 2), muestra una parte del proceso de clasificación a partir de un conjunto de variables de entrada: edad del niño, identificador (id), palabra pronunciada y palabra base**.** La palabra emitida se contrasta con una base compuesta por 187 palabras del protocolo PEFF-R, organizados en tres categorías: repetición de sílabas, repetición de palabras y denominación de imágenes**,** cuando la palabra pronunciada no coincide con la base esperada, el sistema clasifica la producción según su modo articulatorio (oclusivas sordas, oclusivas sonoras, nasales, africada, lateral, fricativas, róticas, grupos consonánticos laterales, grupos consonánticos centrales, diptongos crecientes y decrecientes), la posición silábica en la que aparece (ISPP, ISIP, CSIP o CSFP), el segmento contrastivo correspondiente y la edad base de adquisición propuesta por el PEFF-R**.** Este procedimiento permite identificar de manera estructurada los errores fonológicos y vincularlos con los hitos esperados del desarrollo fonético -fonológico infantil.

6. *Colección de datos clasificados.* Se consolida una base de datos estructurada con campos mínimos: id, edad, modalidad, palabra base, palabra pronunciada, categoría fonológica, posición *(ISPP/ISIP/CSIP/CSFP),* tipo de error, fecha

7. *Análisis con BAM y BiLSTM.* Las dos arquitecturas de IA tienen enfoques complementarios: la BAM y la BiLSTM**.** Ambas redes fueron seleccionadas debido a su capacidad para modelar relaciones no lineales.

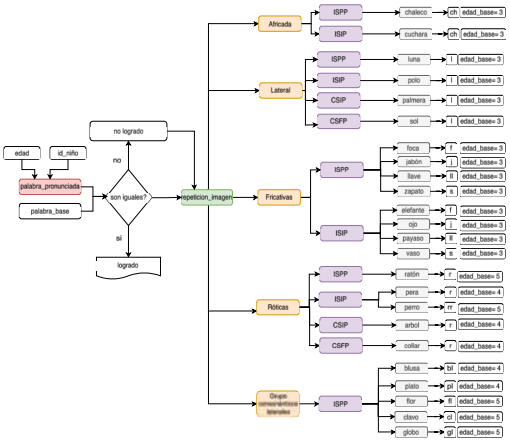


Figura 2. Flujo de clasificación de palabras en categorías y posiciones silábicas.

3.2.1 Desarrollo de BAM

La topología de BAM se basa en dos capas de neuronas (entrada y salida) conectadas entre sí mediante una matriz de pesos sin retroalimentación interna. En este estudio, las palabras base y las palabras pronunciadas se codificaron en vectores binarios mediante esquema one-hot. Estos vectores se almacenaron como pares asociados en la matriz de pesos, permitiendo la recuperación en ambos sentidos (palabra base → pronunciada y pronunciada → palabra base). Se entrena con la regla hebbiana, acumulando productos exteriores de cada par, durante la fase de recuperación, la red proyecta un vector de entrada hacia la capa opuesta, ajustando sus valores mediante funciones de activación por bloque.

Este estudio inicia con la lectura y normalización de las palabras base dichas por los niños, posteriormente, cada palabra se transforma en una **c**odificación binaria tipo one-hot por bloques, garantizando que todos los caracteres queden representados en vectores de longitud uniforme, una vez teniendo el modelo previamente entrenado, las palabras base se introducen como vectores de entrada y la BAM genera una predicción de la forma fonológica esperada, la cual es decodificada nuevamente a texto, posteriormente se aplica una regla de riesgo fonológico que clasifica la producción como de riesgo "bajo" o "alto" , según coincida o no la palabra dicha con la palabra base esperada. Además, se calcula la distancia de Levenshtein para medir la similitud entre producciones y se registran errores por letra y por posición.

a) Codificación de palabras (one-hot por bloques), la fórmula (1) muestra cómo se convierte palabra en un vector binario concatenado de representaciones one-hot por carácter, se codificaron tanto la palabra base como la palabra pronunciada por el niño, de modo que puedan compararse fonema por fonema y alimentar la BAM.

$$x = [e(c_1), e(c_2), \dots, e(c_L)] \in \{0,1\}^{L \cdot N} \quad (1)$$

$\boldsymbol{c_i}$: carácter en la posición *i* de la palabra.
$\boldsymbol{L}$: longitud máxima de la palabra (rellenada con "-" si es más corta).
$\boldsymbol{N}$: tamaño del alfabeto (aquí, 27 letras del español con ñ).
$\boldsymbol{e(c_i)}$: vector one-hot de dimensión *N* que representa el carácter $\boldsymbol{c_i}$.

b) Matriz de pesos asociativos -Regla de aprendizaje por pares, la matriz de pesos Wse forma sumando todas las asociaciones de entrenamiento, mediante (2), donde se guarda la memoria asociativa: cada par $x^{(k)} \leftrightarrow y^{(k)}$se representa en W. Se entrenó la BAM con 87 niños y 187 palabras del PEFF-R dando la sumatoria de 16,269 y generando así una matriz de pesos relacionando la forma esperada de la palabra con la producción real del niño.

$$W = \sum_{k=1}^{P} x^{(k)} \cdot (y^{(k)})^{\top} \quad (2)$$

$\boldsymbol{P}$: número de pares de entrenamiento (palabra base – palabra dicha).
$x^{(k)}$: vector codificado de la palabra base en el par k.
$y^{(k)}$: vector codificado de la palabra pronunciada.
W: matriz de pesos que almacena todas las asociaciones aprendidas.

c) Recuperación de patrones (bidireccional), se actualiza entrada y salida de forma iterativa mediante (3), permitiendo recuperar una palabra a partir de su par asociado, se usó para comprobar si la BAM podía reconstruir la palabra base a partir de la pronunciación del niño, o viceversa,

$$\text{(dirección } x \to y\text{): } y' = f(xW)$$
$$\text{(dirección } y \to x\text{): } x' = f(yW^{\top}) \quad (3)$$

$\boldsymbol{f(\cdot)}$**:** función de activación binaria (0/1 según el signo del valor).
$\boldsymbol{y'}$: palabra predicha a partir de la base.
$\boldsymbol{x'}$: palabra predicha a partir de la dicha.

d) Comparación y evaluación, se buscan estados estables minimizando la distancia de Levenhtein y mide que tan diferente es la salida predicha de la pronunciación real. Regla de riesgo fonológico**,** se define un criterio de riesgo como (4).

$$Riesgo = \begin{cases} \text{bajo}, & \text{si } y' = y \\ \text{Alto}, & \text{si } y' \neq y \end{cases} \quad (4)$$

e) Distancia de Levenshtein (evaluación por palabra), se aplicó para comparar la palabra pronunciada por el niño con la palabra predicha por la BAM, permitiendo evaluar los errores mediante (6).

Sea $a = (a_1, \dots, a_m)$y $b = (b_1, \dots, b_n)$ dos secuencias palabra esperada y palabra pronunciada. La distancia de edición se define recursivamente.

$$d(i,0) = i, d(0,j) = j,$$

$$d(i,j) = \min\{\begin{matrix} d(i-1,j)+1 & \text{(omisión)} \\ d(i,j-1)+1 & \text{(inserción)} \\ d(i-1,j-1)+1_{a_i \neq b_j} & \text{(sustitución)} \end{matrix} \quad (6)$$

donde $\mathbf{1}_{a_i \neq b_j} = 1$ si los caracteres son distintos, y 0 en caso contrario.

3.2.2 Desarrollo de BiLSTM

La capa forward transmite información del pasado al futuro, mientras que la capa backward transmite información del futuro al pasado. Esta doble direccionalidad permite capturar dependencias contextuales más amplias, lo que resulta especialmente relevante en el análisis fonológico, donde la correcta interpretación de un fonema depende tanto de los sonidos previos como de los posteriores en la palabra.

En este estudio, las palabras base y las producciones infantiles se transformaron primero en secuencias de índices mediante un vocabulario predefinido del alfabeto español. Posteriormente, estos índices se mapearon a vectores densos a través de una capa de embeddings, los cuales alimentaron dos capas BiLSTM apiladas con regularización por dropout. La salida secuencial se procesó mediante una capa TimeDistributed con activación softmax para predecir carácter por carácter la palabra pronunciada.

El entrenamiento se llevó a cabo con la función de pérdida de entropía cruzada y el optimizador Adam, ajustando los parámetros en múltiples épocas. La evaluación incluyó métricas de coincidencia exacta por palabra, distancia promedio de Levenshtein. A continuación, se desglosa cada componente del proceso.

a) Codificación de la entrada y embeddings, con (7) se convierte cada palabra en una representación numérica, se mapeó índice- carácter y luego con embeddings, para este estudio se transformaron en secuencias de índices de longitud fija, posteriormente, cada índice fue proyectado en un espacio de 64 dimensiones mediante una capa de embedding, lo que permitió a la red reconocer similitudes fonológicas entre letras como /p/ y /b/, mejorando la sensibilidad al contexto fonético

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_L), x_t \in \{0,1,\dots,N-1\} \quad (7)$$

$\boldsymbol{X}$: palabra representada como secuencia de índices.
$\boldsymbol{L}$: longitud máxima de palabra (aquí $L = 8$).
$\boldsymbol{N}$: tamaño del vocabulario (número de caracteres en el alfabeto).
$\boldsymbol{x_t}$: índice entero del carácter en la posición t.

Cada índice se transforma en un vector mediante la capa de embeddings mediante la operación (8):

$$\mathbf{e}_t = E[x_t] \in \mathbb{R}^d \quad (8)$$

$\boldsymbol{E} \in \mathbb{R}^{N \times d}$: matriz de embeddings.
$\boldsymbol{d}$: dimensión del embedding ($d = 64$).
$\mathbf{e}_t$: representación vectorial del carácter en la posición t.

b) Dinámica de la celda LSTM, se introduce tres puertas (entrada, olvido y salida), cada celda procesó las secuencias de fonemas de izquierda a derecha y de derecha a izquierda, así se pudo modelar, por ejemplo, cómo la producción del fonema /s/ depende no solo de los sonidos anteriores sino también de los siguientes

c) *Procesamiento Bidirectional Long Short-Term Memory* (BiLSTM, por sus siglas en inglés), se emplearon dos capas LSTM bidireccionales: una de 256 y otra de 128 unidades, que procesaron simultáneamente el contexto previo y posterior de cada fonema. Esto fue crucial porque la interpretación de un segmento fonológico infantil depende tanto de los sonidos iniciales como de los finales en la palabra (ejemplo: distinguir "palo" de "plato"). En BiLSTM, cada secuencia se procesa en dos direcciones:

Forward (→): de $t = 1$a L.
Backward (←): de $t = L$a 1.

La salida en cada paso temporal es la concatenación de la expresión matemática (9).

$$\mathbf{h}_t^{(l)} = [\vec{\mathbf{h}}_t^{(l)}; \overleftarrow{\mathbf{h}}_t^{(l)}]. \quad (9)$$

$\mathbf{h}_t^{(l)}$: salida combinada en la capa $l$en la posición t.
$\vec{\mathbf{h}}_t^{(l)}$: estado oculto hacia adelante.
$\overleftarrow{\mathbf{h}}_t^{(l)}$: estado oculto hacia atrás.

d) Capa de salida y distribución Softmax, usando (10) **se** genera una probabilidad para cada posible carácter en cada posición de la palabra. Softmax asegura que la suma de probabilidades en cada posición sea igual, en cada posición de la palabra pronunciada, la red predijo la letra más probable, de este modo, se obtuvo una secuencia de caracteres que representa la palabra reconstruida por el modelo, permitiendo compararla con la pronunciación real del niño y la palabra base esperada. Cada posición de la palabra predice una letra:

$$\mathbf{o}_t = W\mathbf{h}_t^{(2)} + b$$

$$\hat{p}_t(k) = \frac{\exp(\mathbf{o}_t(k))}{\sum_{j=1}^{N} exp(\mathbf{o}_t(j))} \quad (10)$$

$\mathbf{o_t} \in \mathbb{R}^{\boldsymbol{N}}$**:** vector de logits (una puntuación por carácter).
$\boldsymbol{W} \in \mathbb{R}^{\boldsymbol{N \times 256}}, \boldsymbol{b} \in \mathbb{R}^{\boldsymbol{N}}$**:** parámetros de la capa densa.
$\hat{\boldsymbol{p}}_{\boldsymbol{t}}(\boldsymbol{k})$: probabilidad predicha de que el carácter en la posición t sea la letra k.

La letra predicha se da por la formula (11).

$$\hat{y}_t = \arg\max_k \hat{p}_t(k) \quad (11)$$

e) Función de pérdida, usando (12) se evalúa qué tan diferente es la predicción de la red con respecto a la palabra real

producida por el niño, la red ajusta sus pesos minimizando esta diferencia.

La red se entrena minimizando la pérdida de entropía cruzada categórica:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{B}\sum_{b=1}^{B} \frac{1}{L}\sum_{t=1}^{L} log\, \hat{p}_t^{(b)}(y_t^{(b)}) \quad (12)$$

$\boldsymbol{B}$: tamaño del lote.
$\boldsymbol{y_t^{(b)}}$: índice real del carácter esperado en la posición t del ejemplo b.
$\boldsymbol{\hat{p}_t^{(b)}(y_t^{(b)})}$: probabilidad asignada por el modelo a la letra correcta.

e) Métricas de evaluación, permiten medir la eficacia del modelo en la predicción fonológica, se requiere evaluar exactitud y tipos de error. Para este estudio se calcularon: Exact match, mide el porcentaje de palabras predichas exactamente iguales a las pronunciadas, la distancia de Levenshtein, mide cuántas operaciones (cambio, inserción o eliminación de letras) son necesarias para transformar la palabra predicha en la dicha por el niño y Métricas por carácter (precisión, recall y F1-score) que cuantifican aciertos y errores en cada fonema específico, permitiendo identificar qué letras y posiciones son más problemáticas en el habla infantil.

4. RESULTADOS

El registro y evaluación fonológica en la red BAM (Fig 3), analiza la palabra base chaleco y la producción infantil *chaleco*, donde la comparación carácter a carácter confirma coincidencia total. En contraste, en el segundo ejemplo la palabra base también es chaleco, pero el niño pronuncia taleco. El sistema identifica los errores de sustitución de *c* por *t* y omisión de *h*, registrando la categoría "africada" con subcategoría ISPP y señalando la presencia de errores. La evaluación final determina que la palabra no forma la estructura contrastiva y se encuentra fuera de la edad esperada.

```
=== REGISTRO DE DATOS DEL NIÑO ===
ID del niño:  005
Nombre del niño:
Edad del niño (ej. 3.5):  4.2
Seleccione modalidad (imagen/silabas/sonido):  imagen
Palabra base esperada:  chaleco
Palabra dicha por el niño:  chaleco
=== RESULTADO DE COMPARACIÓN ===
c vs c → correcto
h vs h → correcto
a vs a → correcto
l vs l → correcto
e vs e → correcto
c vs c → correcto
o vs o → correcto
=== CLASIFICACIÓN FONOLÓGICA ===
Categoría: Africada
Subcategoría: ISPP
Estructura esperada: ch
Edad base esperada: 3
=== RESULTADO FINAL ===
Tipo de error fonológico: Ninguno
Evaluación final         :  Palabra lograda con estructura fonética correcta
```

```
=== REGISTRO DE DATOS DEL NIÑO ===
ID del niño:  001
Nombre del niño:
Edad del niño (ej. 3.5):  4
Seleccione modalidad (imagen/silabas/sonido):  imagen
Palabra base esperada:  chaleco
Palabra dicha por el niño:  taleco
=== RESULTADO DE COMPARACIÓN ===
c vs t → sustitución
h vs - → omisión
a vs a → correcto
l vs l → correcto
e vs e → correcto
c vs c → correcto
o vs o → correcto
=== CLASIFICACIÓN FONOLÓGICA ===
Categoría: Africada
Subcategoría: ISPP
Estructura esperada: ch
Edad base esperada: 3
=== RESULTADO FINAL ===
Tipo de error fonológico: Errores presentes
Evaluación final         :  No forma la palabra ni la estructura contrastiva y está fuera de la edad esperada
```

Figura 3. Registro y evaluación fonológica en la red BAM

Los resultados fonológicos obtenidos con la predicción BAM (Fig 4), aplicó al conjunto de 16,992 palabras. Los indicadores muestran que el modelo no alcanzó un rendimiento, evidencia un sesgo marcado hacia la predicción de la vocal "a", lo que coincide con los errores más frecuentes o→a, l→a, e→a, i→a, cada uno con más de 5,000 ocurrencias. Este comportamiento revela que la red colapsó hacia un patrón dominante, perdiendo la capacidad de discriminar entre fonemas distintos, comprobado mediante las métricas globales (Fig 5).

ID	Edad	Sexo	Palabra base	Palabra dicha	Resultado de comparación	Evaluación final	Riesgo fonológico	Palabra predicha con BAM	Distancia Levenshtein BAM
n001	4.6	f	i	i	correcto	Palabra lograda exactamente.	bajo	iaaaaa	4	Incorrecto
n001	4.6	f	u	u	correcto	Palabra lograda exactamente.	bajo	naa	3	Incorrecto
n001	4.6	m	banco	banco	correcto	Palabra lograda con estructura fonética correcta	bajo	aaaaaa	5	Incorrecto
n001	4.6	m	patin	tin	mixto	No forma la palabra, pero sí la evaluación contrastiva	alto	aaaaaa	6	Incorrecto
n001	4.6	m	melón	melón	correcto	Palabra lograda con estructura fonética correcta	bajo	aaaaaa	6	Incorrecto
n001	4.6	m	chico	chico	correcto	Palabra lograda con estructura fonética correcta	bajo	aaaaaa	6	Incorrecto
n001	4.6	m	lucha	ucha	omisión	No forma la palabra, pero sí la evaluación contrastiva	alto	aaaaaa	5	Incorrecto

Figura 4. Resultados fonológicos con predicción BAM

Letra	precision	recall	f1-score	support
a	0.22	1.00	0.36	15599
b	0.00	0.00	0.00	2122
c	0.00	0.00	0.00	3919
d	0.00	0.00	0.00	1327
e	0.00	0.00	0.00	5128
f	0.00	0.00	0.00	1108
g	0.00	0.00	0.00	1722
h	0.00	0.00	0.00	798
i	1.00	0.02	0.03	4263
j	0.00	0.00	0.00	751
k	0.00	0.00	0.00	71
l	0.00	0.00	0.00	5462
m	0.00	0.00	0.00	2349
n	0.00	0.00	0.00	3891
ñ	0.00	0.00	0.00	0
o	0.00	0.00	0.00	7467
p	0.00	0.00	0.00	3071

q	0.00	0.00	0.00	231
r	0.00	0.00	0.00	1342
s	0.00	0.00	0.00	1954
t	0.00	0.00	0.00	3274
u	0.00	0.00	0.00	2888
v	0.00	0.00	0.00	999
w	0.00	0.00	0.00	0
x	0.00	0.00	0.00	0
y	0.00	0.00	0.00	540
z	0.00	0.00	0.00	379
accuracy			**0.22**	**70655**
macro avg	**0.05**	**0.04**	**0.01**	**70655**
weighted avg	**0.11**	**0.22**	**0.08**	**70655**

Figura 5. Reporte de métricas BAM

En cuanto a la red BiLSTM, el reporte de las métricas (Fig 6) muestra un desempeño global robusto, alcanzando un 89 % de exactitud por carácter y valores equilibrados de precisión, recall y f1-score ponderados (0.89 cada uno). Se observa un rendimiento sobresaliente en letras de alta frecuencia como a, b, c, e, f, i y p, donde los valores de f1 superan el 0.80, lo que indica una predicción consistente y confiable. Sin embargo, existen debilidades en fonemas más complejos o con menor representación como *r* (f1=0.23) y *l* (f1=0.69), que evidencian dificultades de la red para capturar sus variaciones fonológicas, también se registra ausencia total en caracteres como *ñ*, *w* y *x*, lo que refleja limitaciones en la cobertura del dataset, debido a que aún no se registran palabras para evaluar dichos fonemas.

Fonema	precision	recall	f1-score	support
a	0.96	0.96	0.96	80349
b	0.82	0.87	0.84	2122
c	0.86	0.91	0.88	3919
d	0.60	0.67	0.63	1330
e	0.83	0.86	0.85	5265
f	0.85	0.91	0.88	1108
g	0.77	0.87	0.82	1724
h	0.86	0.80	0.83	799
i	0.83	0.84	0.83	4270
j	0.83	0.91	0.87	751
k	0.93	0.99	0.96	71
l	0.70	0.67	0.69	5490
m	0.84	0.86	0.85	2349
n	0.81	0.72	0.77	3945
ñ	0.00	0.00	0.00	0
o	0.79	0.82	0.80	7655
p	0.89	0.91	0.90	3071
q	0.71	0.68	0.70	231
r	0.43	0.16	0.23	1398
s	0.74	0.79	0.76	1955
t	0.80	0.76	0.78	3322
u	0.80	0.86	0.83	2893
v	0.76	0.85	0.80	999
w	0.00	0.00	0.00	0
x	0.00	0.00	0.00	0
y	0.73	0.50	0.59	541
z	0.67	0.91	0.77	379
accuracy			**0.89**	**135936**

Figura 6. El reporte de las métricas BiLSTM

Las mayores dificultades de la red BiLSTM se concentran en las posiciones intermedias de las palabras (Fig 7), en particular, la posición 2, 3 y 4**,** en contraste, las posiciones iniciales 1, 6, 7 y 8 registran menos equivocaciones, este comportamiento sugiere que la red tiene un desempeño más estable al reconocer los caracteres de inicio y final de la palabra.

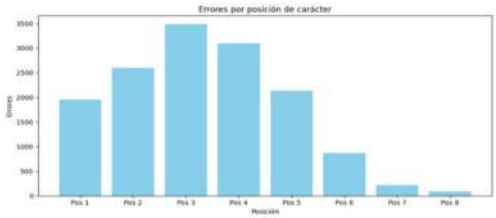


Figura 7. Errores por posición de carácter

La gráfica (Fig 8), muestra los pares de confusión más frecuentes en el reconocimiento fonológico con la red BiLSTM. Los errores más destacados corresponden a la sustitución de "l → a" (683 veces)**,** seguida de "o → a" (639 veces) y "a → o" (638 veces)**,** "r → a" (412)**,** "a → e" (386) y "a → l" (380), lo que refleja la dificultad de la red para distinguir entre fonemas cercanos en la cadena silábica. Los errores menos frecuentes dentro del top 10 incluyen "a → n" (258)**,** "l → d" (255) **y** "n → a" (233)**.**

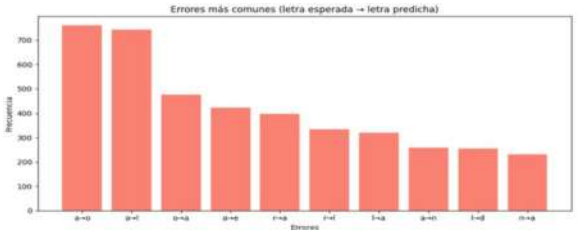


Figura 8. Pares de confusión en el reconocimiento fonológico con la red BiLSTM

En la gráfica, pérdida por época (fig 9), presenta el comportamiento de la función de pérdida durante el entrenamiento y validación de la red BiLSTM. Se observa una rápida disminución en las primeras épocas, lo que indica que el modelo aprendió patrones significativos desde las fases iniciales. Posteriormente, ambas curvas (entrenamiento y validación) convergen de manera estable hacia valores cercanos a 0.35**,** sin evidencia de sobreajuste, ya que la pérdida de validación sigue de cerca a la de entrenamiento.

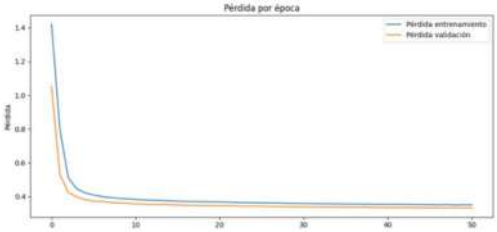


Figura 9. Pérdida por época en el entrenamiento y validación de la red BiLSTM

El resultado con predicción BiLSTM (Fig. 10) muestra cómo el modelo procesa las palabras y evalúa su desempeño. En la columna Palabra predicha modelo se observa la secuencia generada tras el entrenamiento, mientras que la columna predicción correcta indica si existe coincidencia exacta con la

palabra esperada True o si se presentan diferencias False. En conjunto, estos indicadores permiten cuantificar la precisión alcanzada por la red y, al mismo tiempo, identificar patrones de error.

Palabra base	Palabra dicha	Palabra base modelo	Palabra predicha modelo	Distancia Levenshtein	Predicción correcta
o	o	oaaaaaaa	oaaaaaaa	0	True
u	u	uaaaaaaa	uaaaaaaa	0	True
ia	ia	iaaaaaaa	iaaaaaaa	0	True
io	io	ioaaaaaa	ioaaaaaa	0	True
ie	ia	ieaaaaaa	ieaaaaaa	1	False
					……
cero	cero	ceroaaaa	ceroaaaa	0	True
curita	cudita	curitaaa	culitaaa	1	False
zorro	zorro	zorroaaa	zoloaaaa	3	False
guitarra	guitarra	guitarraa	guitaraa	1	False
arbol	arbol	arbolaaa	abllaaa	2	False
cerdo	cerdo	cerdoaaa	celoaaaa	3	False
carta	carta	cartaaaa	cataaaaa	2	False

Figura 10. Resultados fonológicos con predicción BiLSTM

5 CONCLUSIONES

La BAM mostró limitaciones estructurales para el problema abordado. Al trabajar con un alfabeto amplio y secuencias largas como las palabras, la red tendió a colapsar hacia salidas muy frecuentes y perdió capacidad discriminativa entre fonemas. En este contexto, su utilidad se restringe a funciones de memoria asociativa con pocos patrones. No obstante, resultó consistente como apoyo para clasificar y etiquetar tipos de error fonológico (omisiones, sustituciones y distorsiones).

La BiLSTM demostró ser adecuada para la predicción secuencial de palabras infantiles. Al modelar dependencias contextuales en ambas direcciones, alcanzó 89% de exactitud por carácter y 63.12% de coincidencia exacta por palabra, con desempeño especialmente sólido en fonemas de alta frecuencia. Persisten desafíos en fonemas complejos o menos representados y en posiciones intermedias de la palabra, lo que sugiere la necesidad de ampliar y balancear el conjunto de datos.

En conjunto, los resultados respaldan una estrategia híbrida: emplear modelos secuenciales como BiLSTM para la reconstrucción y predicción de producciones fonológicas y aprovechar mecanismos tipo BAM u otras reglas explícitas para el apoyo en la detección y categorización de errores.

REFERENCIAS

Alás, A. et al. (2022) Trastornos del lenguaje, del habla y de la comunicación. Conceptos, clasificación y clínica. Asociación Española de Pediatría.

Bosch, L. (2004) Evaluación fonológica del habla infantil. Barcelona: Masson.

Cervera, J.F. and Ygual, A. (2001) Estrategias para la percepción de rasgos fonológicos. Edetania, pp. 151–166.

Fan, Y. et al. (2024) BiLSTM-MLAM: A Multi-Scale Time Series Prediction Model for Sensor Data Based on Bi-LSTM and Local Attention Mechanisms. Sensors, 24(12), p. 3962.

Hochreiter, S. and Schmidhuber, J. (1997) Long Short-Term Memory. Neural Computation, 9(8), pp. 1735–1780.

Malakar, M. and Keskar, R.B. (2021) Progress of machine learning based automatic phoneme recognition and its prospect. Speech Communication, 135, pp. 37–53.

Melgar de González, M. (1976) Cómo detectar al niño con problemas del habla. Trillas.

Olabe, X.B. (2008) Redes neuronales artificiales y sus aplicaciones.Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Superior de Ingeniería Bilbao.

Perea, F. (2024) Una historia de los términos fonética y fonología en español (1843-1918). Revista argentina de historiografía lingüística.

Susanibar, F. et al. (2016) Trastornos del habla de los fundamentos a la evaluación. 4ta edn. España: GiuntiEOS.

Susanibar, F., Condori, O. and Dioses, A. (2013) Fundamentos para la evaluación de las alteraciones del Habla de origen fonético-fonológico. Diose, pp. 319–362.

Vivar, P.A. and León, H. (2009) Desarrollo fonológico-fonético en un grupo de niños entre 3 y 5, 11 años. CEFAC.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

TDS Sensor Analysis with Artificial Neural Network for Water Quality Evaluation

GF Pérez-García * **VI Ruiz-Pérez** * **D López-Cortés** *
JA Fragoso-Mandujano ** **A de Jésus Flores-García** **
AZ Aguilar-Sántiz **

* *Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, Universidad Autónoma de Chiapas , Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México (e-mail: gilbert.perez@unach.mx).*
** *Tecnológico Nacional de México/I.T. de Tuxtla Gutiérrez , Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.*

Abstract: Access to safe water is a pressing global issue, with an estimated two billion people worldwide lacking reliable drinking water services. To address this problem, this work presents the experimental development of a system for measuring Total Dissolved Solids (TDS). The proposed TDS sensor employs platinum electrodes in a Wheatstone bridge configuration (reading the voltage at V_g and indirectly estimating the solution resistance R_X) and sampling with Arduino through the ADS1256 module. The analyzed TDS samples consist of deionized water solutions with different concentrations of common salt, characterized at temperatures of 25°C, 35°C, and 45°C. Data analysis is performed using an incremental constructive neural network (ICNN), and validation of the proposed system was carried out by comparing the obtained measurements with those from a commercial meter, Hanna Instruments model HI98130. The experimental results require further testing to ensure robustness and generalization capability in real-world water quality monitoring scenarios. The proposed ICNN achieved an MAE $\approx$ 170 ppm, RMSE $\approx$ 183 ppm, and MAPE $\approx$ 7.4 % on the validation data. Although these results are not as accurate as those of the Hanna HI98130 meter (MAE 6.4 ppm, RMSE 9.0 ppm), they demonstrate the feasibility of the low-cost sensor with nonlinear temperature effects captured by the network, and suggest areas for future improvement.

Keywords: TDS, conductivity, temperature compensation, constructive neural network, inductive calibration, Arduino sensors, Hanna HI98130 TDS.

1. INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable es una necesidad fundamental para la humanidad; sin embargo, asegurar su higiene y seguridad representa un desafío global significativo. Según informes recientes de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la organización para el cuidado del agua (UN-Water), entre los años 2020 y 2024 cerca de dos mil millones de personas no tuvieron acceso a servicios de agua potable segura e higiénica, situación que afecta directamente la salud pública y compromete el saneamiento básico en las comunidades afectadas. Dentro de los parámetros importantes para determinar la calidad del agua, los valores de los Sólidos Totales Disueltos (TDS) son un indicador útil para detectar posibles contaminaciones provenientes de residuos agrícolas, industriales o de procesos de salinización de acuíferos. La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece límites de referencia que oscilan entre 300 y 600 ppm para evaluar la calidad del agua potable.

El principio para determinar los valores TDS en un líquido se basa en la evaluación de la conductividad eléctrica (EC). Para su medición, se utiliza una celda de conductividad calibrada (K), se registran los valores de conductividad y se convierten en valores TDS mediante factores empíricos k. Los instrumentos comerciales aplican corrección debido al error en los valores TDS por cambios de temperatura, normalmente usando un coeficiente lineal típico en soluciones iónicas diluidas. Estas metodologías requieren calibración periódica debido a los cambios de temperatura y el tratamiento de efectos no ideales como la polarización de electrodos, la dependencia en la composición iónica y otros efectos no ideales.

Ante estas limitaciones, los métodos de aprendizaje automático ofrecen una alternativa al permitir modelar relaciones no lineales y dependencias complejas sin necesidad de formular un modelo físico explícito. Técnicas como las redes neuronales artificiales (RNA), las máquinas de vectores de soporte (SVM) y los ensamblados como Random Forest o XGBoost han demostrado mejorar la estimación de valores TDS cuando la composición del agua es variable o cuando el ruido instrumental afecta las mediciones. Sin embargo, la mayoría de los trabajos reportados para

⋆ Sponsor and financial support acknowledgment goes here. Paper titles should be written in uppercase and lowercase letters, not all uppercase.

el cálculo de valores TDS se basan en la conductividad eléctrica ya preprocesada o en variables agregadas.

El objetivo de esta investigación es proponer un enfoque diferente, mediante una configuración experimental que permita realizar las mediciones TDS de forma indirecta. Para lograrlo, se propone una configuración experimental basada en un puente de Wheatstone, que permite medir cambios en el voltaje v_g. El voltaje obtenido se procesa mediante un módulo convertidor analógico-digital (ADC) y posteriormente se digitaliza en un procesador monoplaca para su ejecución en tiempo real. Las lecturas de voltaje se utilizan como entradas de una red neuronal constructiva. La validación se realiza mediante un medidor comercial de la marca Hanna, modelo HI98130, que compensa errores de lectura debido al efecto térmico en la conductividad mediante mediciones internas de temperatura.

Los objetivos específicos de esta investigación son:

1. Diseñar y montar un sensor de TDS basado en puente de Wheatstone y Arduino;
2. Desarrollar y entrenar una red neuronal inductiva para estimar el valor de TDS;
3. Validar el sistema comparando las mediciones de TDS estimadas con las del medidor comercial Hanna HI98130.

Se plantea la hipótesis de que la ICNN propuesta, alimentada con la señal de voltaje cruda, reducirá el error de estimación de TDS en comparación con métodos lineales convencionales.

2. ESTADO DEL ARTE

La práctica común para determinar el parámetro de TDS consiste en medir la conductividad eléctrica de la muestra utilizando una celda previamente calibrada, convirtiendo luego esa medición en valores representativos de la cantidad de sólidos disueltos mediante factores empíricos denominados k (Hubert et al., 2015). Los instrumentos tradicionales suelen incluir una compensación lineal por temperatura como corrección para soluciones iónicas diluidas; este enfoque es ampliamente utilizado debido a su simplicidad. Sin embargo, puede resultar insuficiente para soluciones con composiciones iónicas atípicas, además de requerir calibraciones periódicas para mantener su confiabilidad. Instrumentos más avanzados (Hanna HI98130) ofrecen la posibilidad de ajustar coeficientes o de aplicar modelos no lineales cuando la aplicación lo requiere.

Para prototipado y aplicaciones de bajo costo existen módulos como el DFRobot/Gravity Analog TDS V1.0 (o equivalentes), que proporcionan salida analógica (0–2.3 V), alimentación 3.3–5.5 V y usan excitación AC para reducir errores por el efecto de la polarización. Estos módulos son prácticos para la validación y despliegues rápidos, pero los fabricantes mismos advierten sobre la necesidad de calibración y limitaciones de precisión ($\pm 10\,\%$ FS a 25 °C) y rango (0–1000 ppm). La electrónica de acondicionamiento y la elección de la frecuencia son factores críticos para obtener lecturas reproducibles y lineales en un amplio rango de conductividades (Ishai et al., 2013).

Además de los sensores convencionales de cobre, en los últimos años se reportaron algunos trabajos sobre técnicas de aprendizaje automático para estimar valores de sólidos disueltos totales o de conductividad eléctrica a partir de variables directas, como mediciones de conductividad eléctrica y de temperatura, así como de variables indirectas obtenidas mediante sensores remotos, satélite, parámetros hidrológicos, entre otros.

Entre los trabajos destacados se encuentra el de Adjovu et al. (2023), quienes compararon varios modelos de aprendizaje automático, incluyendo Redes Neuronales Artificiales (RNA), Máquinas de Vectores de Soporte (SVM), K-Vecinos Más Cercanos (KNN), y métodos ensamblados como Random Forest (RF) y XGBoost, con el objetivo de estimar los TDS en lago Mead (Río Colorado, Estados Unidos) usando el parámetro de la conductividad eléctrica y la temperatura. Como resultado de su investigación mostraron que los enfoques de aprendizaje automático, especialmente los ensamblados y las redes neuronales artificiales bien entrenadas, superaron a los modelos lineales clásicos en cuanto a rendimiento predictivo y robustez frente a ruido.

Al año siguiente, Sayadi et al. (2024), propusieron un esquema híbrido que combina optimización mediante el algoritmo Grey Wolf con el algoritmo de Kernel Extreme Learning Machine para modelar valores de TDS. Este esquema demostró mejoras significativas en precisión comparado con el uso aislado del algoritmo Extreme Learning Machine (ELM) o modelos clásicos. Su trabajo ilustra la tendencia de combinar optimizadores metaheurísticos con modelos de aprendizaje automático para optimizar hiperparámetros y potenciar la capacidad de generalización de estos modelos.

Otras investigaciones recientes de autores como Jamshidzadeh et al. (2024), exploraron técnicas de aprendizaje profundo y frameworks híbridos para predecir valores de TDS y conductividad eléctrica en cuencas como la del río Karkheh (Amini et al. (2025)) y plantas de tratamiento de aguas residuales; las revisiones muestran que la conductividad eléctrica y la cantidad de sólidos disueltos son variables que se puede modelar mediante aprendizaje automático, siempre y cuando se disponga de datos representativos y se realice un preprocesamiento adecuado que incluye normalización, selección de variables relevantes y tratamiento adecuado de la temperatura. De la misma forma, Sun et al. (2021), integró aprendizaje automático, supresión de ruido y algoritmos evolutivos para mejorar la predicción de TDS en sistemas fluviales.

Durante la revisión bibliográfica, destacamos el trabajo de Bock et al. (1994), cuyo enfoque para analizar señales de entrada nos resultó particularmente interesante. En su investigación proponen un método constructivo inductivo aplicado a la obtención de señales provenientes de 32 fotodiodos. Este método implica una selección iterativa de puntos de calibración donde el error es máximo, lo que optimiza el uso de medidas patrón (generalmente costosas en laboratorio) y tiende a distribuir el error a lo largo del rango de medición, lo que representa una ventaja práctica frente a entrenamientos convencionales que requieren grandes conjuntos de datos calibrados.

Aunque el artículo original de Bock (1994) se centra en un sensor óptico y propone esta estrategia inductiva para múltiples entradas; adaptar su metodología a señales

eléctricas generadas por electrodos para medir sólidos disueltos totales representaría un aporte robusto dentro del área de estudio. En resumen, los métodos tradicionales que convierten conductividad eléctrica a valores TDS aplicando compensación lineal por temperatura son sencillos y rápidos pero dependen de calibraciones periódicas y fallan cuando la composición iónica o los efectos de interfase son atípicos. En cuánto a los módulos comerciales como el sensor TDS Gravity, son prácticos para validación y proyectos de tipo DIY, pero tienen precisión limitada y requieren ajustes por temperatura y calibración de forma periódica. Por otro lado, los modelos de inteligencia artifical han demostrado mejorar la estimación cuando se dispone de datos representativos, sin embargo, la mayoría de los trabajos de aprendizaje automático utilizan como entradas mediciones preprocesadas de conductividad eléctrica y temperatura. En contraste con la mayoría de estos trabajos que usan la señal de conductividad eléctrica procesada o valores de temperatura y luego modelan valores TDS, en este trabajo se explora la señal cruda del puente de Wheatstone como entrada a una red neuronal inductiva, lo que puede capturar no linealidades entre la interfaz del electrodo y la solución.

3. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

En esta sección se describe la metodología utilizada en el estudio (ver Figura 1).

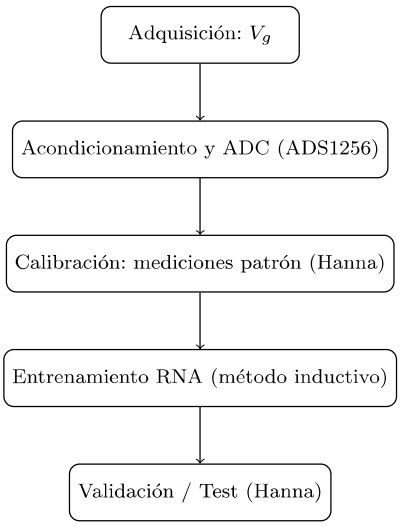


Figura 1. Diagrama de flujo metodológico.

El sistema se compone de tres bloques principales.

Bloque sensor y adquisición:

En esta etapa, se realiza la adquisición de los datos mediante una par de electrodos sumergidos en la solución bajo estudio. Estos electrodos están alimentados por una señal de corriente alterna a través de una configuración de puente de Wheatstone, donde se mide el voltaje V_g para estimar el valor de la resistencia R_x asociada a la solución. El valor de voltaje obtenido se registra mediante un convertidor ADC, y esta información se transmite al Arduino a través de una señal síncrona. Para validar del sistema, los valores obtenidos se comparan con las mediciones TDS adquiridas con el medidor comercial Hanna HI98130. La base de datos para la calibración se generó a partir de mediciones patrón concurrentes realizadas con el medidor Hanna HI98130, **registrándose** $n = 3$ repeticiones por punto en condiciones experimentales controladas de 25 °C, 35 °C y 45 °C.

Bloque de procesamiento analógico: Esta etapa comprende las acciones de acoplamiento y amplificación diferencial de la caída de voltaje en V_g en la configuración del puente de Wheatstone.

Bloque de calibración y red neuronal constructiva: En esta etapa se implementa el método inductivo de Bock para desarrollar una red neuronal artificial compacta. El objetivo es procesar las señales acondicionadas del sensor, para generar como salida el valor compensado TDS.

3.1 Preparación de las muestras

Para la caracterización del sistema experimental se empleó sal común como soluto de referencia. Las soluciones experimentales se prepararon disolviendo cantidades estimadas de sal común en 1000 mL de agua desionizada, generando las diferentes concentraciones de estudio. Las mediciones se realizaron bajo tres temperaturas controladas: 25 °C, 35 °C y 45 °C, evaluando veinticinco concentraciones diferentes, distribuidas a lo largo del rango operativo considerado. Previo a cada medición, se esperó estabilidad térmica y homogeneidad de la muestra para minimizar errores por gradientes térmicos.

En la tabla 1 se muestra algunas concentraciones de sal utilizadas y su porcentaje de Masa. Se empleó una balanza analítica marca Uline modelo H-9885 con resolución 0.01 g.

Tabla 1. Concentraciones de NaCl usadas en la etapa de calibración (masa de sal en 1000 mL de agua desionizada)

Sal común (% peso)	**Masa de sal (g)**
0.5	5.0
1	10.0
1.5	15.0
2	20.0
2.5	25.0
3	30.0
3.5	35.0
4	40.0
4.5	45.0
5	50.0

3.2 Montaje experimental

En esta sección se describe el montaje experimental propuesto para realizar la medición de sólidos disueltos totales (ver Figura 2).

La celda de ensayo consiste contenedor de vidrio cúbico con dimensiones internas $10 \times 10 \times 10$ cm (volumen nominal $= 1000$ cm$^3 = 1000$ mL). Dentro de la celda se colocaron dos electrodos de platino con caras activas cuadradas de lado 1 cm (área $A = 1$ cm^2) y espesor aproximado 1 mm.

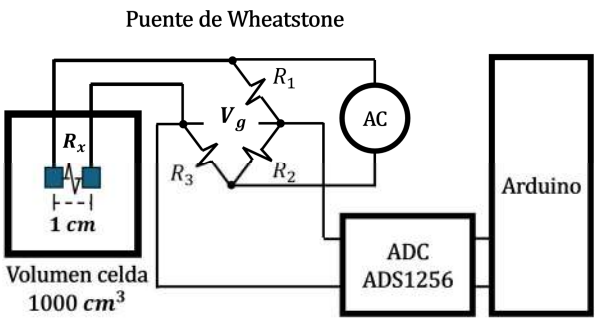


Figura 2. Diagrama esquemático de la electrónica del sistema propuesto

Los electrodos se disponen como placas paralelas separadas $d = 1$ cm.

Los electrodos dentro del recipiente, quedaron a la mitad de altura ($z = 5$ cm), con centros aproximadamente en $x = 4{,}5$ cm y $x = 5{,}5$ cm, lo que asegura una distancia adecuada respecto a las paredes para minimizar efectos de borde.

Para la alimentación de los electrodos y medición de los cambios de concentración de la solución bajo estudio, se utilizó una configuración de puente de Wheatstone.

La alimentación de los electrodos se realizó mediante un generador de señales (Marca Juntek modelo JDS6600), que generó una señal de corriente alterna a una frecuencia de 1 KHz. La medición indirecta de la resistencia de la solución entre los electrodos se realizó mediante la medición del voltaje V_g (ver Figura 2). Debido a la baja amplitud de esta señal, se utilizó un módulo convertidor analógico-digital (AD) de 24 bits (modelo ADS1256) configurado con $V_{REF} = 2{,}500$ V, $PGA = 8$ para maximizar la resolución con señales $V_g \approx 0{,}1 - 0{,}6$ V. La conexión con Arduino Uno se realizó vía SPI (pines $MISO/MOSI/SCK/CS$)

3.3 Diseño y metodología de la red neuronal

En esta sección se describe el comportamiento y diseño de la ICNN propuesta para esta investigación (ver Figura 3.

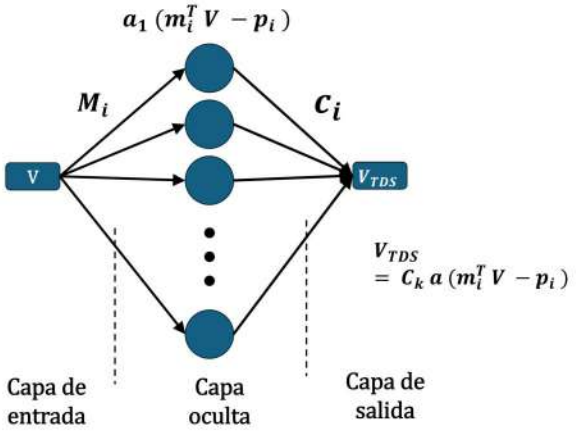


Figura 3. Diagrama interno de la red neuronal constructiva

El sistema de análisis fue programado dentro de una Raspberry Pi 5 y consiste en una red neuronal con una arquitectura en cascada. La red cuenta con un único valor en la capa de entrada (V_g) seguida de una capa oculta no lineal y una capa de salida lineal que realiza la interpolación final.

El entrenamiento sigue la metodología inductiva propuesta por Bock et al. (1994): la red se construye unidad por unidad, agregando en cada iteración una nueva neurona cuyo papel es reducir la desviación máxima entre la salida del modelo y la referencia de calibración.

De manera conceptual la red se organiza de la siguiente manera:

Capa de combinación lineal. Una matriz M cuyas columnas m_k generan combinaciones lineales de las señales de entrada $V(E)$.

Capa oculta no lineal. Cada unidad oculta aplica una función no lineal de base ("a-función"); en este trabajo se emplean funciones tipo

$$a(x) = \arctan(\alpha x - A)$$

y, en la práctica, las entradas a la unidad son de la forma $m_k^T V - p_k$.

Capa de interpolación (salida lineal). Las salidas de las unidades ocultas se combinan linealmente mediante el vector de pesos C para producir la estimación $\hat{E}$:

$$\hat{E}(V) = \sum_{k=1}^{n} C_k\, a(m_k^T V - p_k).$$

Sea $V(E)$ el vector de lecturas (amplitud de voltaje de V_g). Tras seleccionar n puntos de calibración $E_1, \ldots, E_n$, definimos la matriz de activaciones A con entradas

$$A_{ij} = a\big(m_j^T V(E_i) - p_j\big),$$

y el vector objetivo b con $b_i = E_i$. Buscar el vector de pesos de salida C que interpola los n puntos se escribe como el sistema lineal

$$A\,C = b,$$

resuelto por mínimos cuadrados con regularización Tikhonov:

$$C = \big(A^T A + \lambda I\big)^{-1} A^T b.$$

Del conjunto total de datos obtenidos se utilizó en 60 % de datos para realizar el entrenamiento inductivo, el 20 % para validación y el 20 % para prueba. Además se empleó validación cruzada de 5 folds durante la búsqueda de hiperparámetros para evitar sobreajuste. Para reportar la performance final se utilizan MAE, RMSE y MAPE calculados sobre el conjunto de prueba independiente.

La Figura 4 ilustra la arquitectura propuesta y el ciclo de entrenamiento inductivo. Las entradas al sistema son el voltaje del puente V_g; la matriz M genera combinaciones lineales de las entradas que alimentan unidades ocultas no lineales $a(\cdot)$; la salida es una combinación lineal de dichas activaciones mediante el vector C. El entrenamiento sigue el esquema de Bock: se identifica el punto de mayor error, se diseña una nueva combinación m_k y su sesgo p_k, y se recalculan los pesos de salida por mínimos cuadrados regularizados.

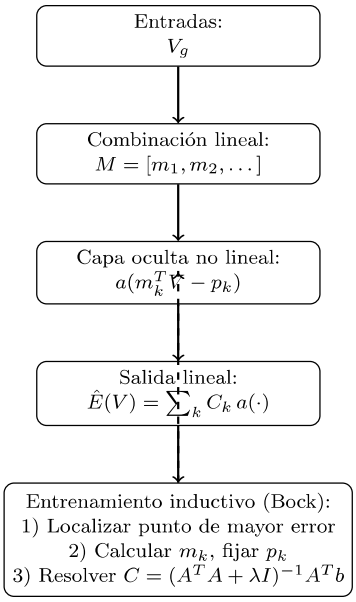


Figura 4. Arquitectura y flujo vertical del método inductivo

3.4 Integración electrónica - red neuronal

La integración entre la parte electrónica de adquisición de datos y el algoritmo de calibración inductiva se realizó bajo un esquema maestro-esclavo: el muestreo se efectuó en un microcontrolador Arduino Uno y el preprocesado avanzado, el entrenamiento inductivo y la inferencia en tiempo real se ejecutaron en una Raspberry Pi 5. Esta separación permite mantener la adquisición síncrona y con baja latencia en hardware sencillo, mientras que la Pi gestiona las operaciones matriciales y la lógica de calibración.

En la parte de la adquisición de datos, el Arduino realiza el muestreo proveniente del módulo ADC ADS1256 mediante protocolo SPI. Simultáneamente se toma la lectura del valor TDS a través del medidor TDS Hanna HI98130. El Arduino se comunica con la Raspberry a través del puerto serial. En el diseño experimental, las entradas de la ICNN propuesta son la señal de voltaje Vg cruda bajo una etapa de acondicionamiento de señal para que pueda ser leída, mientras que la salida de la red, es el valor estimado de TDS.

El entrenamiento inductivo se ejecuta en la Pi y sigue el ciclo unitario: localiza el punto de mayor desviación sobre las muestras disponibles, calcula la nueva combinación lineal m_k resolviendo el sistema discreto $P\,m = L$, fija el sesgo p_k (por ejemplo $p_k = m_k^T V_{\max\,\text{error}}$) y actualiza los pesos de salida C resolviendo el problema de mínimos cuadrados regularizado

$$C = (A^T A + \lambda I)^{-1} A^T b,$$

donde $A_{ij} = a\big(m_j^T V(E_i) - p_j\big)$ y $b_i = E_i$ son las activaciones y los valores objetivo correspondientes a los puntos de calibración E_i. Las operaciones lineales implicadas (construcción de A, productos $A^T A$, y pequeñas inversiones de matrices) se realizan con bibliotecas numéricas de Python (p. e., `NumPy`). En la práctica las matrices tienen dimensión $N \times k$, donde N es el número de muestras y k el número de neuronas actuales; dado que k permanece reducido, el coste computacional por iteración permite ejecución interactiva y actualizaciones en tiempo real sobre la Raspberry Pi.

Una vez resueltos los parámetros, el proceso de inferencia evalúa, para cada nueva lectura, la estimación

$$V(\mathbf{TDS}) = \sum_{k=1}^{n} C_k\, a\big(m_k^T \mathbf{V} - p_k\big),$$

y devuelve la predicción de TDS que incluye el efecto de la temperatura.

3.5 Repeticiones y Tratamiento de Incertidumbre

Cada punto experimental se determinó mediante la media de $n = 3$ mediciones independientes, asegurando la estabilización térmica completa del sistema antes de cada medición.

La incertidumbre total del sistema experimental se evaluó considerando diversas contribuciones, que incluyen el error inherente del Conversor Analógico-Digital (ADC) ADS1256 (que abarca su resolución y ruido bajo condiciones específicas de $V_{REF} = 2{,}500$ V y PGA = 8), la incertidumbre instrumental de la balanza con una resolución de 0,01 g que afecta la precisión en la preparación de soluciones, y la variabilidad térmica determinada por la precisión del sensor (±0,2 °C) y la estabilidad de la celda.

Estas contribuciones se combinaron mediante el método de propagación de incertidumbres (suma cuadrática) para obtener una estimación de la incertidumbre expandida en las mediciones de los valores TDS.

4. RESULTADOS

A continuación, en las tablas 2–4 se muestran las mediciones obtenidas para las concentraciones medidas para cada temperatura (25, 35 y 45 °C) en un ensayo realizado. Los datos muestran una progresión monótona de las magnitudes con la concentración: al aumentar la concentración de NaCl (ppm) aumenta la conductancia de la solución y disminuye la resistencia equivalente R_x. Al elevar la temperatura (25, 35, 45 °C) la conductividad de la solución incrementa, este incremento reduce R_x para la misma ppm nominal y provoca diferencias observables en V_g entre tablas a distinta temperaturas: a mayor temperatura, para la misma concentración, se obtiene un desplazamiento de V_g consistente con menor resistencia.

Finalmente en la tabla 5 se muestra los resultados comparativos entre la red neuronal y el medidor TDS comercial Hanna HI98130. Esta tabla contiene quince mediciones uniformemente distribuidas de la serie de calibración a tres temperaturas (25, 35 y 45 °C), para un total de 45 muestras representativas (NaCl desde 0 hasta 7000 ppm).

En la tabla 6 se muestra un concentrado de los errores absolutos y porcentuales para los puntos validados entre la red neuronal artificial constructiva y el medidor comercial Hanna. Los errores absolutos de la RNA varían ampliamente, desde -293.448 ppm hasta +223.543 ppm, lo que indica una gran variabilidad en la precisión de las mediciones. En comparación, los errores absolutos y

Tabla 2. Mediciones para NaCl a 25 °C.

NaCl (ppm)	$V_{g,\mathrm{rms}}$ **(V)**	R_x **(ohms)**	**Hanna (ppm)**
0.0000	0.4929	2170.8550	0.0000
416.6667	0.4736	2039.5700	413.7310
833.3333	0.4543	1920.0960	839.7270
1250.0000	0.4349	1810.9130	1252.7980
1666.6667	0.4156	1710.7370	1662.9000
2083.3333	0.3963	1618.5060	2081.4740
2500.0000	0.3770	1533.3020	2509.7930
2916.6667	0.3577	1454.3800	2915.3600
3333.3333	0.3383	1381.2010	3338.2130
3750.0000	0.3190	1313.3560	3756.3570
4166.6667	0.2997	1250.5530	4157.1360
4583.3333	0.2804	1192.5760	4582.6720
5000.0000	0.2610	1139.2470	4998.4390
5416.6667	0.2417	1089.4200	5438.8500
5833.3333	0.2224	1043.0010	5829.2550
6250.0000	0.2031	999.9250	6229.5220
6666.6667	0.1837	960.1560	6676.1840
7083.3333	0.1644	923.6740	7102.1210
7500.0000	0.1451	890.4650	7516.2860
7916.6667	0.1258	860.5230	7912.6620
8333.3333	0.1064	833.8530	8333.1640
8750.0000	0.0871	810.4650	8756.8730
9166.6667	0.0678	790.3770	9163.2260
9583.3333	0.0485	773.6110	9582.6710
10000.0000	0.0291	760.1920	10000.0000

Tabla 3. Mediciones para NaCl a 35 °C.

NaCl (ppm)	$V_{g,\mathrm{rms}}$ **(V)**	R_x **(ohms)**	**Hanna (ppm)**
0.0000	0.5022	2238.5340	0.0000
416.6667	0.4831	2102.8390	417.4140
833.3333	0.4641	1979.4630	834.6280
1250.0000	0.4451	1866.7970	1253.4190
1666.6667	0.4260	1763.4980	1668.9940
2083.3333	0.4070	1668.4550	2088.0650
2500.0000	0.3879	1580.7080	2506.6940
2916.6667	0.3689	1499.4560	2919.8360
3333.3333	0.3498	1423.0480	3332.9890
3750.0000	0.3308	1350.9450	3753.9320
4166.6667	0.3117	1282.7400	4148.9410
4583.3333	0.2927	1218.1060	4587.9540
5000.0000	0.2736	1156.8220	4999.5870
5416.6667	0.2546	1098.7170	5437.6140
5833.3333	0.2355	1043.6660	5818.6200
6250.0000	0.2165	991.5930	6220.4860
6666.6667	0.1974	942.4680	6669.5710
7083.3333	0.1784	896.2940	7104.7620
7500.0000	0.1594	852.1080	7518.4880
7916.6667	0.1403	809.9800	7908.7010
8333.3333	0.1213	769.9990	8329.8610
8750.0000	0.1022	732.2810	8750.5110
9166.6667	0.0832	696.9710	9164.9070
9583.3333	0.0641	664.2460	9589.5150
10000.0000	0.0451	634.3180	10000.0000

porcentuales del medidor Hanna son mucho menores, lo que indica una mayor precisión y confiabilidad en sus mediciones

En la tabla 7 se muestra el resumen de las métricas globales. La ICNN propuesta muestra un error absoluto medio (MAE) de 170.27 ppm y un RMSE de 182.88 ppm en las 45 muestras seleccionadas. Por contraste, el medidor

Tabla 4. Mediciones para NaCl a 45 °C.

NaCl (ppm)	$V_{g,\mathrm{rms}}$ **(V)**	R_x **(ohms)**	**Hanna (ppm)**
0.0000	0.5115	2295.3520	0.0000
416.6667	0.4927	2156.7800	416.6810
833.3333	0.4739	2030.3280	836.5420
1250.0000	0.4552	1914.4960	1258.8810
1666.6667	0.4364	1808.7190	1672.6230
2083.3333	0.4176	1700.8670	2076.5140
2500.0000	0.3988	1600.8210	2509.4490
2916.6667	0.3801	1507.4600	2917.7160
3333.3333	0.3613	1420.6950	3339.1480
3750.0000	0.3425	1339.4790	3759.2320
4166.6667	0.3238	1262.7960	4153.6540
4583.3333	0.3050	1189.7340	4586.1870
5000.0000	0.2862	1119.3990	4998.1190
5416.6667	0.2675	1051.9150	5424.8730
5833.3333	0.2487	986.4210	5812.0040
6250.0000	0.2299	922.0650	6216.7310
6666.6667	0.2112	858.9980	6670.3320
7083.3333	0.1924	797.3850	7101.1540
7500.0000	0.1736	737.3950	7517.0180
7916.6667	0.1548	679.2120	7902.4890
8333.3333	0.1361	623.0280	8335.3110
8750.0000	0.1173	568.0440	8752.8610
9166.6667	0.0985	514.4670	9167.8740
9583.3333	0.0798	462.5050	9586.8920
10000.0000	0.0610	412.3790	10000.0000

Hanna presenta un MAE de 6.39 ppm y un RMSE de 8.95 ppm. Se advierte que la métrica MAPE es inestable cuando el valor de referencia es cercano a cero (división por valores pequeños produce MAPE alto en muestras con TDS aproximadamente igual a 0). Por ello, además del MAPE global, reportamos MAE y RMSE y, cuando proceda, MAPE calculado excluyendo muestras con TDS menor a 10 ppm.

La ICNN propuesta exhibe además un sesgo dependiente de la temperatura (sobreestimación en 25 °C; subestimación en 35–45 °C) y errores porcentuales puntuales elevados (MAPE global aproximadamente de 7.37 %, error porcentual máximo observado 48.10 %, caso de 500 ppm a 45 °C). Estos datos indican que, aunque la RNA puede interpolar fuera de sus puntos de entrenamiento, todavía requiere un tratamiento explícito del efecto temperatura y mayor densidad de datos en regiones críticas para alcanzar la precisión requerida en aplicaciones prácticas.

A fin de complementar el análisis cuantitativo de las métricas globales presentadas en la Tabla 7, en la Figura 5 se muestra la comparación directa entre los valores TDS predichos por la ICNN propuesta y las mediciones del medidor comercial Hanna HI98130. Se observa una buena correlación general entre ambos conjuntos de datos, aunque con un sesgo térmico perceptible en las temperaturas extremas (25 °C y 45 °C). El coeficiente de correlación de Pearson entre las lecturas de la ICNN propuesta y las del medidor Hanna es $R = 0{,}997$ ($R^2 = 0{,}994$), lo que confirma la fuerte relación lineal entre ambos sistemas. Para el cálculo de las métricas (MAE, RMSE, MAPE) se compararon las predicciones frente a la concentración nominal de NaCl; las métricas reportadas en la Tabla 7 excluyen explícitamente las tres muestras con NaCl =

Tabla 5. Tabla comparativa: predicción RNA (ppm) y lectura Hanna (ppm).

T (°C)	Vg,rms (V)	NaCl (ppm)	RNA (ppm)	Hanna (ppm)
25	0.4929	0.0000	73.9681	0.0000
25	0.4697	500.0000	619.2660	498.9300
25	0.4465	1000.0000	1124.3627	1004.9556
25	0.4234	1500.0000	1625.0667	1498.8590
25	0.4002	2000.0000	2137.0541	1997.7594
25	0.3770	2500.0000	2646.6800	2509.7930
25	0.3538	3000.0000	3153.7290	2999.9304
25	0.3306	3500.0000	3657.6896	3505.4708
25	0.3074	4000.0000	4161.9098	3996.8242
25	0.2842	4500.0000	4676.8240	4497.5650
25	0.2610	5000.0000	5194.5361	4998.4390
25	0.2378	5500.0000	5686.6150	5516.9308
25	0.2146	6000.0000	6191.6330	5989.3620
25	0.1915	6500.0000	6723.5427	6497.5190
25	0.1683	7000.0000	7207.0616	7016.9338
35	0.5022	0.0000	34.3265	0.0000
35	0.4793	500.0000	402.3403	500.8566
35	0.4565	1000.0000	901.5012	1002.1446
35	0.4336	1500.0000	1402.5524	1502.7638
35	0.4108	2000.0000	1907.7690	2004.2510
35	0.3879	2500.0000	2403.6052	2506.6940
35	0.3651	3000.0000	2895.7781	3002.4664
35	0.3422	3500.0000	3406.2457	3501.3664
35	0.3193	4000.0000	3906.9596	3990.9372
35	0.2965	4500.0000	4408.8695	4500.1516
35	0.2736	5000.0000	4871.6879	4999.5870
35	0.2508	5500.0000	5395.4088	5513.8150
35	0.2279	6000.0000	5908.0005	5979.3666
35	0.2051	6500.0000	6430.8719	6489.9368
35	0.1822	7000.0000	6904.0042	7017.7240
45	0.5115	0.0000	-14.6153	0.0000
45	0.4889	500.0000	259.4873	500.6530
45	0.4664	1000.0000	790.6165	1005.4778
45	0.4439	1500.0000	1282.8904	1507.1260
45	0.4214	2000.0000	1769.2374	1995.7360
45	0.3988	2500.0000	2265.5373	2509.4490
45	0.3763	3000.0000	2761.3412	3002.0022
45	0.3538	3500.0000	3253.4356	3507.1818
45	0.3313	4000.0000	3743.0848	3995.8850
45	0.3088	4500.0000	4234.5472	4499.6806
45	0.2862	5000.0000	4737.8074	4998.1190
45	0.2637	5500.0000	5253.8048	5502.2990
45	0.2412	6000.0000	5714.3726	5973.8950
45	0.2097	6500.0000	6206.5518	6488.8914
45	0.1961	7000.0000	6736.4810	7014.9898

Tabla 6. Errores absolutos y porcentuales para los puntos validados.

error RNA (ppm)	%error RNA	error Hanna (ppm)	%error Hanna
+73.9680	N/A	+0.0000	N/A
+119.2660	+23.8532 %	-1.0700	-0.2140 %
+124.3630	+12.4363 %	+4.9560	+0.4956 %
+125.0670	+8.3378 %	-1.1410	-0.0761 %
+137.0540	+6.8527 %	-2.2410	-0.1120 %
+146.6800	+5.8672 %	+9.7930	+0.3917 %
+153.7290	+5.1243 %	-0.0700	-0.0023 %
+157.6900	+4.5054 %	+5.4710	+0.1563 %
+161.9100	+4.0477 %	-3.1760	-0.0794 %
+176.8240	+3.9294 %	-2.4350	-0.0541 %
+194.5360	+3.8907 %	-1.5610	-0.0312 %
+186.6150	+3.3930 %	+16.9310	+0.3078 %
+191.6330	+3.1939 %	-10.6380	-0.1773 %
+223.5430	+3.4391 %	-2.4810	-0.0382 %
+207.0620	+2.9580 %	+16.9340	+0.2419 %
+34.3270	N/A	+0.0000	N/A
-97.6600	-19.5319 %	+0.8570	+0.1713 %
-98.4990	-9.8499 %	+2.1450	+0.2145 %
-97.4480	-6.4965 %	+2.7640	+0.1843 %
-92.2310	-4.6115 %	+4.2510	+0.2126 %
-96.3950	-3.8558 %	+6.6940	+0.2678 %
-104.2220	-3.4741 %	+2.4660	+0.0822 %
-93.7540	-2.6787 %	+1.3660	+0.0390 %
-93.0400	-2.3260 %	-9.0630	-0.2266 %
-91.1300	-2.0251 %	+0.1520	+0.0034 %
-128.3120	-2.5662 %	-0.4130	-0.0083 %
-104.5910	-1.9017 %	+13.8150	+0.2512 %
-91.9990	-1.5333 %	-20.6330	-0.3439 %
-69.1280	-1.0635 %	-10.0630	-0.1548 %
-95.9960	-1.3714 %	+17.7240	+0.2532 %
-14.6150	N/A	+0.0000	N/A
-240.5130	-48.1025 %	+0.6530	+0.1306 %
-209.3830	-20.9383 %	+5.4780	+0.5478 %
-217.1100	-14.4740 %	+7.1260	+0.4751 %
-230.7630	-11.5381 %	-4.2640	-0.2132 %
-234.4630	-9.3785 %	+9.4490	+0.3780 %
-238.6590	-7.9553 %	+2.0020	+0.0667 %
-246.5640	-7.0447 %	+7.1820	+0.2052 %
-256.9150	-6.4229 %	-4.1150	-0.1029 %
-265.4530	-5.8990 %	-0.3190	-0.0071 %
-262.1930	-5.2439 %	-1.8810	-0.0376 %
-246.1950	-4.4763 %	+2.2990	+0.0418 %
-285.6270	-4.7605 %	-26.1050	-0.4351 %
-293.4480	-4.5146 %	-11.1090	-0.1709 %
-263.5190	-3.7646 %	+14.9900	+0.2141 %

0 ppm (para evitar inestabilidad en MAPE en valores cercanos a cero).

Por otra parte, la Figura 6 muestra el comportamiento del error relativo de la red neuronal en función de la concentración y la temperatura. Se aprecia que el error se mantiene bajo y estable en concentraciones medias (2000–6000 ppm), mientras que aumenta en concentraciones bajas y a temperaturas elevadas, confirmando la necesidad de ampliar la base de datos experimental y de incorporar la temperatura como entrada explícita del modelo predictivo.

5. CONCLUSIONES

Este estudio presenta una evaluación inicial de una red neuronal constructiva para estimar concentración de NaCl (ppm) a partir la señal eléctrica de voltaje V_g obtenida mediante una configuración de puente de Wheatstone. Los resultados muestran que la ICNN propuesta presenta un sesgo claro dependiente de la temperatura, sobreestimando las concentraciones a 25 °C con un error medio de +159 ppm, y subestimando a 35 °C y 45 °C con errores medios de -88 ppm y -234 ppm, respectivamente. Además, se observaron errores porcentuales significativos en puntos

Tabla 7. Métricas globales para RNA y Hanna HI98130

Métrica	Red Neuronal propuesta	Medidor Hanna HI98130
MAE (ppm)	170.27	6.39
RMSE (ppm)	182.88	8.95
MAPE (%)	7.37	0.18
Error % máximo	48.10	0.54

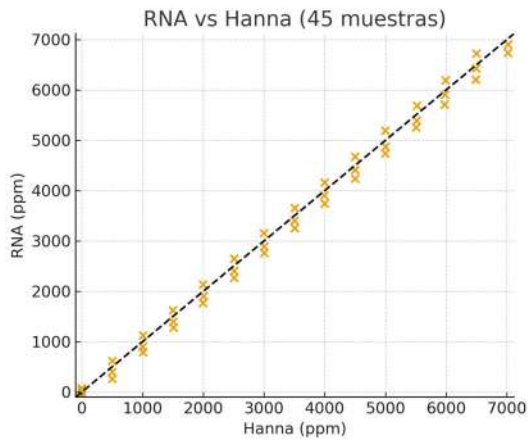


Figura 5. Comparación entre los valores TDS estimados por la red neuronal (RNA) y las mediciones del medidor comercial Hanna HI98130. La línea diagonal representa el ajuste ideal (RNA = Hanna).

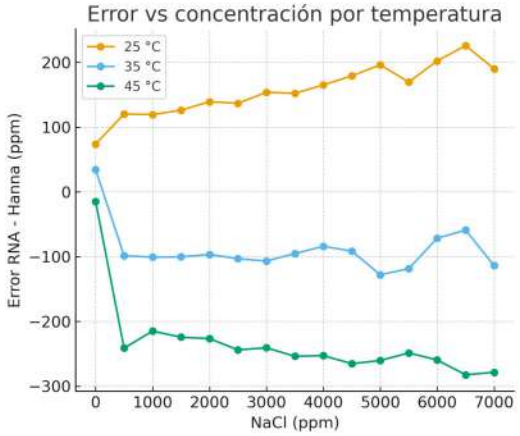


Figura 6. Error relativo (%) de la red neuronal en función de la concentración de NaCl y la temperatura.

específicos, con un error máximo de -48.10 % a 500 ppm y 45 °C, lo que sugiere que la ICNN propuesta requiere ajustes para compensar correctamente el efecto de la temperatura en todo el rango de medición.

Aunque la ICNN propuesta muestra capacidad para estimar valores fuera de su conjunto de entrenamiento, la presencia de sesgos por temperatura sugiere mejorar su robustez o introducir correcciones. Para lograrlo, se propone incluir la temperatura como entrada explícita en el modelo o entrenar modelos separados por temperatura, permitiendo a la red aprender la variación térmica de la función de transferencia. Además, se recomienda ampliar el conjunto de entrenamiento con más mediciones en regiones con grandes errores, como alrededor de 500 ppm a 45 °C, y equilibrar la distribución de datos por temperatura y concentración para mejorar la precisión y generalización del modelo.

Comparando con trabajos recientes, se observa que los enfoques de aprendizaje automático pueden superar modelos lineales cuando se dispone de datos representativos (Adjovu et al., 2023; Sayadi et al., 2024). Nuestro MAE y RMSE (170.3, 182.9 ppm) son mayores que los reportados por instrumentos comerciales, pero comparables en orden de magnitud a implementaciones de bajo costo que no realizan una compensación térmica explícita. Las diferencias con estudios que reportan RMSE menores pueden deberse a: (i) distinto rango de concentración estudiado; (ii) uso de entradas preprocesadas (EC normalizada) en lugar de la señal de puente cruda; y (iii) tamaños de base de datos y estrategia de calibración. Estos factores justifican ampliar la base de datos y explorar estrategias híbridas (optimización + ML), tal como se reportó en (Sayadi et al., 2024).

REFERENCIAS

Adjovu, G.E., Stephen, H., and Ahmad, S. (2023). A machine learning approach for the estimation of total dissolved solids concentration in lake mead using electrical conductivity and temperature. *Water*, 15(13), 2439. doi:10.3390/w15132439.

Amini, H., Fakheri, F., Dar, J.Y., Shakeri, R., Nejati, H., Lam, M.Y., Zahraie, B., and Ahmadian, R. (2025). Tds prediction with wavelet analysis and trend-seasonal decomposition and machine learning algorithms, case study: Karkheh river, iran. *Water Conservation Science and Engineering*, 10, 63. URL `https://doi.org/10.1007/s41101-025-00390-z`.

Bock, W.J., Porada, E., Beaulieu, M., and Eftimov, T.A. (1994). Automatic calibration of a fiber-optic strain sensor using a self-learning system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 43(2), 274–279. doi:10.1109/19.276335. Método inductivo / constructivo para calibración automática.

Hubert, E. et al. (2015). Establishing a conversion factor between electrical conductivity and total dissolved solids in south african mine waters. *Water SA / South African Journal of Water*, 41(4), 475–483. Estudio de variabilidad del factor EC→TDS en aguas reales.

Ishai, P.B., Talary, M.S., Caduff, A., Levy, E., and Feldman, Y. (2013). Topical review: Electrode polarization in dielectric measurements – a review. *Measurement Science and Technology*, 24(10), 102001. doi: 10.1088/0957-0233/24/10/102001.

Jamshidzadeh, Z., Latif, S.D., Ehteram, M., Khozani, Z.S., Ahmed, A.N., Sherif, M., and El-Shafie, A. (2024). An advanced hybrid deep learning model for predicting total dissolved solids and electrical conductivity (ec) in coastal aquifers. *Environmental Sciences Europe*, 36(1), 20. Modelo híbrido profundo para predicción de TDS y EC en acuíferos costeros.

Sayadi, M., Hessari, M., Montaseri, M., and Naghibi, A. (2024). Enhanced tds modeling using an ai framework integrating grey wolf optimization with kernel extreme learning machine. *Water*, 16(19), 2818. doi: 10.3390/w16192818.

Sun, K., Rajabtabar, M., Samadi, S., and Rezaie-Balf, M. (2021). An integrated machine learning, noise suppression, and population-based algorithm to improve total dissolved solids prediction. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 15(1), 1–17.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Beyond Weight: A Machine Learning Approach for Exploring the Relevance of Additional Clinical Features in Hypothyroidism

Karla M. García-Castillo* Valeria Maeda-Gutiérrez* Luis Carlos Reveles Gómez* Carlos E. Galván-Tejada* Gwendolyne Méndez Frausto Juan José Oropeza-Valdez*****

**Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas 98000 México (e-mail: karla.garcia.castillo, valeria.maeda, luiscarlosreveles, ericgalvan @uaz.edu.mx)*

***Unidad Académica de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas 98000 México (e-mail: qfm.mendez @outlook.com)*

**** Centro de Ciencias de la Complejidad, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) México City, México (e-mail: juan.oropeza @c3.unam.mx)*

Abstract: Hypothyroidism, an endocrine disorder, commonly treated with levothyroxine (LT4), where dosage is traditionally based on patient's body weight, often leading to suboptimal outcomes. This study explores Machine Learning (ML) models to predict euthyroid status in hypothyroid patients after an initial LT4 treatment, leveraging baseline clinical features beyond body weight. A dataset of 24 patients was used, 14 complete cases for training and 10 with missing values for testing imputed using MissForest. We trained Logistic Regression, Random Forest, Gaussian Naive Bayes, and an Artificial Neural Networks (ANN), with hyper-parameters optimization via Grid Search. Models achieved test accuracies around 0.70, and an Area Under the Curve (AUC) ranging from 0.72 to 0.96, with ANNs showing superior discriminative performance. These preliminary findings suggest that multifactorial predictive models can support more personalized and effective hypothyroidism management.

Keywords: Hypothyroidism, Machine Learning, euthyroid prediction, personalized medicine

1. INTRODUCTION

The endocrine system is a fundamental control and communication system in the human body, responsible for the production and distribution of chemical messengers known as Hormones, which regulate critical biological processes including growth, reproduction and metabolism (Blair and Rushton, 2021). Among the main organs of this system is the thyroid gland, which synthesizes, stores, and releases the hormones Triiodothyronine (T3) and Thyroxine (T4). These hormones regulate basal energy expenditure, protein synthesis and body temperature, their adequate levels are essential for proper fetal development, early childhood growth, and the support of neurological, reproductive, skeletal and metabolic functions throughout adulthood (Betts *et al.*, 2013). Consequently, disruptions in thyroid hormone levels can result in wide-ranging and severe physical-psychological consequences.

The thyroid dysfunction is generally classified into two broad categories: hyperthyroidism, caused by excessive hormone production, and hypothyroidism, which results from insufficient hormone secretion. Each condition disrupts metabolic balance and appears with distinct clinical manifestations. Hypothyroidism and its sub clinical variants, affects approximately 2-10% of the global population (World Health Organization, 2020). The standard treatment involves a lifelong hormone replacement therapy with levothyroxine (LT4). The initial LT4 dosage is traditionally determined by the patient's body weight (1.6 µg/kg/day) (Jonklaas *et al.*, 2014), with subsequent adjustments until achieving an appropriate hormonal balance known as euthyroidism, defined by thyroid-stimulating hormone (TSH) levels ranging between 0.4–4 mIU/L (Santiago-Peña, 2020). However, this simplified approach often leads to suboptimal initial treatment, being inadequate in up to 55.6% of cases (Karataş and Hacıoğlu, 2022). This inaccuracy stems from interindividual variability in response to LT4, driven by factors such as age, sex, comorbidities, drug interactions, genetic characteristics, and hypothyroidism's etiology (Parlá Sardiñas, 2012). Inappropriate dosing, whether excessive or insufficient, leads to persistent symptoms, hormonal imbalances, and long-term complications, highlighting the critical need for more precise and personalized therapeutic approaches.

Previous studies have demonstrated that disease etiology, pre-treatment hormonal values, and the illness prevalence are valuable factors for optimizing T4 dosage (Pustilnik *et al.*, 2021). In this context, machine learning (ML) algorithms and artificial neural networks (ANNs) have emerged as promising tools for analyzing clinical data and uncovering complex patterns among variables that influence illness and treatment response (Sarker, 2021). ML offers an alternative to analyze the variety of data with its algorithms. In a context of classification and prediction of clinical outcomes, models such as Logistic Regression (LR), Gaussian Naïve Bayes (GNB) and Random Forest (RF) have shown the best performance (Dhillon and Singh, 2019). Specifically, in the context of

hypothyroidism management, ML models have shown the capability to outperform traditional methods by integrating multiple clinical variables. For instance, Ngan *et al.* (2025), achieved over 80% of accuracy in LT4 dose estimation by incorporating features such as TSH levels, height, comorbidities, and body weight. Artificial Neural Networks (ANNs), due to their capacity to model complex and nonlinear interactions between variables, have proven to be valuable where interactions between variables may not be linearly evident (Shahid, Rappon and Berta, 2019).

This study aims to evaluate the capacity of ML to predict euthyroid status in hypothyroid patients following an initial LT4 treatment, using baseline clinical features beyond body weight. By working with a limited clinical dataset, we seek to identify relevant predictors even in scenarios with data scarcity, identifying which features contribute most to model performance.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Data acquisition

This study employed the dataset "Hypothyroidism Weight and Serum Thyroid Hormones", published by Anders Funkquist on the Zenodo platform in March 2022 (Funkquist, 2022). The dataset includes information from 75 individuals, collected at the Unit of Endocrinology at the Department of Medicine, Halland Central Hospital, Sweden. Patients were divided into two groups: 50 healthy controls and 25 diagnosed with primary hypothyroidism, it contains clinical and demographic characteristics, and an additional follow-up data after six months of LT4 treatment for 15 of the hypothyroid patients (Funkquist *et al.*, 2023).

Table 1. Summary of dataset features

Category	Variables
Demographics	Patient ID, Group, Sex, Age, Weight (kg), Height (m)
Anthropometrics	BSA (m^2), BMI (kg/m^2)
Thyroid Function (Baseline/Pre-treatment)	Zulewski score (points), Serum TPO (IU/mL), TSH (mIU/L), fT3 (pmol/L), fT4 (pmol/L), fT3/fT4 ratio
Treatment	LT4 dosage (µg /day)
Clinical Outcomes (Post- treatment)	Zulewski score (points), Weight (kg), Serum TPO (IU/mL), TSH (mIU/L), fT3 (pmol/L), fT4 (pmol/L), fT3/fT4 ratio

The bodyweight was measured to the nearest 0.1 kg, and height to the nearest 0.01 m. Body surface area (BSA) was calculated using the Du Bois Formula. Blood samples for thyroid function analysis were collected after a minimum of 8 -hours fasting, using biochemical analyses and thyroids peroxidase antibodies (TPO-Ab) (Funkquist *et al.*, 2023). The Zulewski score, assessing the presence of hypothyroid symptoms, was used as a clinical indicator of the disease (Zulewski *et al.*, 1997).

2.2 Implementation

All data processing and modeling were performed using the Python 3.8 programming language. The primary libraries utilized for this research include Pandas for data manipulation, Scikit-learn for ML models such as LR, RF, GNB, and metrics calculation. TensorFlow and Keras, for ANNs' construction and training.

2.3 Data pre-processing

From the original cohort of 75 individuals, we exclusively analyzed the 25 patients with a confirmed primary hypothyroidism diagnosis (TSH >4.0 mIU/L). Outlier detection, performed via Interquartile Range (IQR) method, in which observations falling below Q1−1.5*IQR or above Q3+1.5*IQR were excluded. However, for the TPO (IU/Ml) variable, no outliers were excluded, as extremely high TPO values, although they may seem statistically atypical, are considered clinical indicators of hypothyroidism in its Hashimoto – immunological variant.

The previous stage yielded a final dataset of 24 patients, 14 of with complete data, and 10 with missing values in the post-treatment features and LT4 dosage information.

2.4 Data splitting and Missing Data Handling

To address the missing values, the dataset was split into:

- Train-set (n=14): patients with complete data.
- Test-set (n=10): patients with missing post-treatment or dosage data.

Missing values in the test-set were imputed using the MissForest algorithm, a robust non-parametric approach capable of handling categorical and continual data (Stekhoven and Bühlmann, 2012). The imputation process involves:

1. The algorithm begins by initializing missing values with the mean (for continuous variables) and the mode (for categorical variables).
2. Variables are then sorted based on the proportion of its missing values.
3. Subsequently, for each variable with missing entries, a random forest is trained using the available values, treating the variable as the response and all the others as predictors.
4. The trained model is then used to predict the missing values.
5. This process repeats iteratively across all variables with missing data until convergence or a maximum number of iterations, it reached.

In this study, the train-set (n=14) was used to train the RF algorithm and impute the missing values in the test-set (n=10). The MissForest algorithm internally estimates imputation error using out-of-bag (OOB) error metrics. For continuous variables, the Normalized Root Mean Squared Error (NRMSE) is used:

$$NRMSE = \sqrt{\frac{mean((X_{true} - X_{imp})^2)}{var(X_{true})}} \quad (1)$$

For categorical variables, the Proportion of Falsely Classified (PFC) values is calculated:

$$PFC = \frac{Number\ of\ incorrect\ imputations}{Total\ number\ of\ missi\quad categorical\ values} \quad (2)$$

MissForest was chosen due to its superior performance compared to other imputation methods, consistently achieving lower error rates and higher quality imputed values (Blandine, 2022).

2.5 Feature selection, Engineering, and Class Balance

The objective of this study is to predict euthyroid status using the patients' initial clinical and demographic characteristics, we approached this as a binary classification problem. For this purpose, the target variable: euthyroid_after_treatment was created based on hormonal serum levels after six months of treatment, initial patients were classified as:

- 1 = Euthyroid: TSH 0.4-4.0 mIU/L (treatment success).
- 0 = Non-Euthyroid: TSH outside normal range (treatment failure).

Feature selection was conducted exclusively on the train-set to avoid data leakage and preserve the integrity of the test set during evaluation. We employed Spearman's rank correlation method as it is suitable for non-normal and non-ordinal data (Mukaka, 2012). Features exhibiting high pair-wise correlation (Spearman's $\rho > 0.8$) were considered redundant and removed to reduce multicolinearity and improve model's generalizability. Additionally, all post treatment variables were excluded from the input space to prevent data leakage from future information.

No class imbalance handling techniques were applied as the dataset exhibited a balanced class distribution in both training and testing sets. Specifically, the Train-set included 7 euthyroid and 7 non euthyroid cases, while the Test-set comprised 5 euthyroid and 5 non euthyroid cases.

2.6 Machine Learning Algorithms

To address the binary classification's task of predicting euthyroid status, we implemented four supervised ML algorithms: Logistic Regression, Gaussian Naïve Bayes, Random Forest and Artificial Neural Networks. These models were selected based on their distinct learning mechanism and successful applications in clinical predictions. Each model has distinct characteristics and hyperparameters that can be tuned to optimize performance.

2.6.1 Logistic Regression

Is a generalized linear model that estimates the probability of a binary outcome (Y=1) through a sigmoid function (Cortes, 1995):

$$P(Y = 1|X) = \frac{1}{1+e^{-(\beta_0+\beta_1 X_1+\cdots\beta_n Xn)}} \quad (3)$$

Here, Y represents the binary outcome (euthyroid = 1), X is the feature vector, β0 is the bias term (intercept), and βi are the model coefficients. The optimization hyper-parameters tuned during training include (Cortes and Vapnik, 1995):

- Regularization strength (C): used to prevent overfitting.
- Penalty: L1 (Lasso), L2 (Ridge), or a combination (Elastic Net).
- Solver: Algorithms such as liblinear, lbfgs, or saga, each suited to different regularization schemes and dataset sizes.

2.6.2 Gaussian Naïve Bayes

It's a probabilistic classifier based on Bayes' theorem, assuming feature independence. In the Gaussian, variant, continuous features are modeled using a normal distribution:

$$P = (x_i|y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}}\exp(-\frac{(x_i-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}) \quad (4)$$

Where μ_y and σ_y represent the mean and standard deviation of the feature in class y. this model does not require hyper parameter tuning, making it highly efficient for small datasets (Zhang, 2004).

2.6.3 Random Forest

RF is an ensemble method based on decision trees (DTs), where this trained on bootstrapped subsets of the data and aggregated through majority voting. It offers robustness against overfitting and handles non-linear relationships effectively (Breiman, 2001). Important hyper-parameters include:

- Number of estimators: number of trees in the forest.
- Maximum depth: tree complexity.
- Minimum samples per split and leaf: regularize growth.
- Criterion: Gini impurity or entropy for node splitting

2.6.4 Artificial Neural Networks

Computational models inspired by the structure and function of the biological brain, designed to recognize patterns and learn from data. They consist of multiple layers of interconnected nodes, known as neurons or units. Each neuron receives inputs from other neurons, calculates a weighted sum of these inputs, and applies a non-linear activation function to produce an output. The output of a typical neuron in a hidden layer can be expressed as:

$$a_j = f\left(\ \sum_{i=1}^{M}\omega_{ij}x_i + b_j\right) \quad (5)$$

Where ω_{ij} are weights, x_i are inputs, b_j is the bias term, and f is a non-linear activation function (hidden layers) or sigmoid (output layer), (Ioffe and Szegedy, 2015).

For optimization, ANNs can include optimization parameters (Bjorck, Gomes and Selman, 2018) such as:

- Number of layers and neurons per layer: define model capacity and complexity.
- Activation functions (ReLU, Leaky RelU, sigmoid)
- Dropout and L2 regularization: for overfitting prevention.
- Learning rate, batch size and early stopping: to monitor performance on validation data.
- Optimizers: Adam, SGD, or RMSprop, for influence in the convergence speed and stability.

2.7 Model Evaluation Metrics

For binary classification, we can employ four key metrics to evaluate how well the ML models perform (Japkowicz and Shah, 2011):
Sensitivity (Recall): measures detection rate of positive cases (Class 1):

$$Sensitivity = \frac{True\ Positives}{True\ Positives + F \quad Negatives} \quad (6)$$

Specificity: Quantifies correct identification of negative cases (Class 0):

$$Specificity = \frac{True\ Negatives}{True\ Negatives + False\ Positived} \quad (7)$$

Accuracy: measures overall correctness in predictions, involving true positives, true negatives, false positives and false negatives.

$$Accuracy = \frac{TP+}{TP+TN+FN+FP} \quad (8)$$

Receiver Operating Characteristic – Area Under the Curve (ROC-AUC): integrates sensitivity and specificity, indicating the model's ability to distinguish between positive and negative classes. An AUC-ROC value of 1.0 represents a perfect classifier, while 0.5 represents a random classifier.

2.8 Hyper parameter tuning with Grid Search and Stratified Fold Cross-Validation

For model's performance optimization and reducing the risk of overfitting, hyper-parameters tuning was conducted using a Grid Search strategy, this evaluates systematically all possible combinations within a set of predefined hyper-parameters, combined with a Stratified 5-Fold Cross-Validation (CV). This approach ensures balanced class representation across folds; the objective function for model selection was the AUC-ROC, prioritizing both sensitivity and specificity.

All hyper-parameter tuning was performed exclusively on the Train-set to prevent data leakage, by avoiding exposure of the model to unseen data during the optimization process, preserving the integrity of the final performance assessment.

3. RESULTS

This section presents the outcomes of the ML models developed to predict the euthyroid status six months after LT4 treatment. Each model was trained using the optimal hyper-parameters obtained through Grid Search and the Train-set. Model performance was then, evaluated on both train and test sets.

3.1 Optimal hyperparameters

The optimal hyper-parameters obtained after the tuning process were as follows:

3.1.1 LR

- Regularization strength C=0.0001
- Penalty type = L2
- Maximum of iterations = 100
- Solver = liblinear

3.1.2 RF

- Number of estimators=50
- Maximum depth=5
- Minimum samples per split= 2
- Minimum samples per leaf=2

3.1.3 ANN

Given the complexity and high computational cost of applying an exhaustive Grid Search, the determination of the architectures and hyper-parameters was performed through an iterative and thorough experimentation process, manually adjusting parameters based on performance on a Train and Test sets. The best-performing three-layer architecture included:

- Layers sizes = 64, 32, 16 neurons
- Activation function= Leaky ReLU (hidden layers) Sigmoid (output layer)
- Dropout rate=0.2
- Optimizer= Adam
- Learning rate= 0.001
- Batch size=2
- Epoch= up to 100 (Early stopping with patience of 10)
- Best weights restored automatically

3.2 Model Performance

3.2.1 Metrics on Train and Test Sets

To evaluate the predictive ability of the trained models, performance metrics were computed on both sets. This dual evaluation allows the identification of overfitting and the assessment of each model's generalization capability.

Table 2 summarizes the performance of the selected models on the train and test set, evaluated using the classification metrics defined in Section 2.7.

Table 2. Performance of classification models

Model	Dataset	ACC	AUC-ROC	SEN	SPE
LR	Train	0.71	0.84	0.57	0.86
	Test	0.70	0.96	0.40	1.00
GNB	Train	0.79	0.96	0.57	1.00
	Test	0.70	0.72	0.40	1.00
RF	Train	1.00	1.00	1.00	1.00
	Test	0.70	0.72	0.40	1.00
ANN I	Train	0.79	0.94	0.71	0.86
	Test	0.70	0.84	0.60	0.80

As shown in Table 2, all models achieved acceptable performance, though with notable differences in generalization ability and sensitivity-specificity trade-offs. LR demonstrated solid performance, suggesting strong discriminatory capacity with perfect sensitivity (1.00). However, this came at the cost of lower specificity (0.40), reflecting an increase in false positives. GNB showed similar accuracy and sensitivity to LR, with a slightly lower AUC-ROC. It also achieved perfect sensitivity, but with limited specificity (0.40, this behavior is typical of probabilistic models favoring recall in imbalanced or uncertain scenarios.

RF obtained the highest performance on the train set, with perfect accuracy and AUC, but its Test accuracy dropped to 0.70, with a lower AUC of 0.72. The sharp contrast between Train and Test scores suggests potential overfitting. ANN achieved consistent performance across datasets, with both Train and Test accuracies of 0.79 and 0.70, respectively, and a balanced AUC-ROC. Unlike the other models, ANN I showed more balanced sensitivity and specificity on the Test set, indicating better generalization and a reduced bias toward the positive class.

In summary, while all models prioritized sensitivity successfully identifying euthyroid cases, ANN I was the most balanced in its classification, demonstrating a better trade-off between sensitivity and specificity, and consistent generalization across both datasets.

3.2.2 Confusion Matrices

The confusion matrices provide a granular view of each model's performance by showing the number of correct and incorrect predictions for each class on both the Train and Test sets. True Positives (TP) represent cases where the model correctly identified Class 1 (euthyroid), while True Negatives (TN) correspond to correctly identified instances of Class 0 (non-euthyroid). Conversely, the False Positives (FP) occur when Class 0 is incorrectly predicted as Class 1, and the False Negatives (FN) represent the opposite case. This detailed breakdown, presented in Table 3, complements the summary metrics shown in Table 2.

Table 3. Confusion matrices of the models on the Train (n=14) and Test (n=10) sets

Model	Dataset	TP	TN	FP	FN
LR	Train	4	6	1	3
	Test	2	5	0	3
GNB	Train	4	7	0	3
	Test	2	5	0	3
RF	Train	7	7	0	0
	Test	2	5	0	3
ANN I	Train	5	6	1	2
	Test	4	3	2	1

According to the results, traditional ML models LR, GNB, and RF demonstrated overfitting, being RF the most pronounced case, achieving perfect classification on the training set (TP=7, TN=7,FP=0, FN=0) while its performance dropped on the test set (TP=2, TN=5, FP=0,FN=3).

Both LR and GNB showed a considerably performance drop in their ability to identify Class 1 (euthyroid). While they achieved high TN and TP on the training set, the models correctly classified only 2 of the 5 positive cases on the test set (TP=2, TN=5, FP=0, FN=3), this indicates a strong bias towards class 0, when generalizing unseen data.

In contrast, ANN I showed the most balanced and generalizable performance. Although its training results were not perfect (TP=5,TN=6,FP=1, FN=2), the model maintained stable performance on the test set (TP=4,TN=3,FP=2,FN=1), demonstrating a superior balance between classes, highlighting its robustness.

3.2.3 Receiver Operating Characteristic (ROC) Curves

The ROC curves illustrate each model's capacity to discriminate between the euthyroid and non-euthyroid classes across various classification thresholds, with values closer to 1.0 indicating a better-performing model.

- LR (Fig. 1): The test set curve shows superior AUC of 0.96, suggesting that the model generalized exceptionally well to the unseen data.
- GNB (Fig. 2): A considerable drop in performance was observed, with a test AUC of 0.72, indicating that the high training performance did not generalize, pointing to potential overfitting.
- RF (Fig. 3): These curves provide a clear example of overfitting. The training AUC of 1.00 drops drastically to 0.72 to the test set.
- ANN I (Fig.4): This model shows highly consistent performance between the training and test sets, maintaining comparable AUC values. Such stability indicates robustness and reliable generalization to both seen and unseen data.

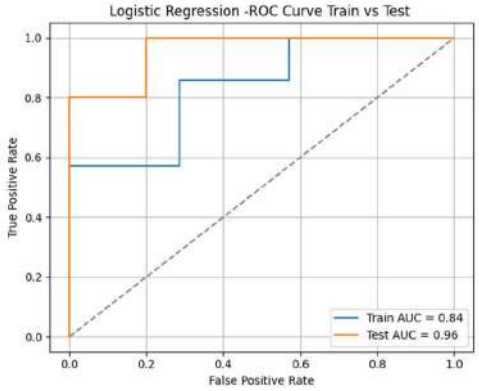


Fig. 1. ROC curves for Train and Test, Logistic Regression

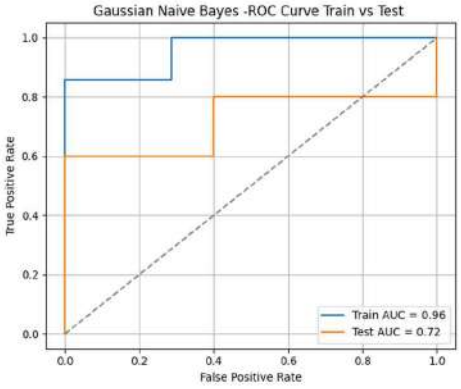


Fig. 2. ROC curves for Train and Test, Gaussian Naïve Bayes

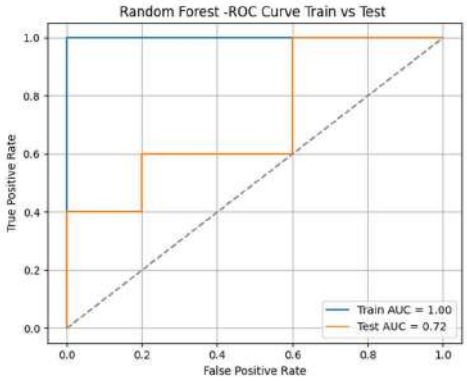


Fig. 3. ROC curves for Train and Test, Random Forest

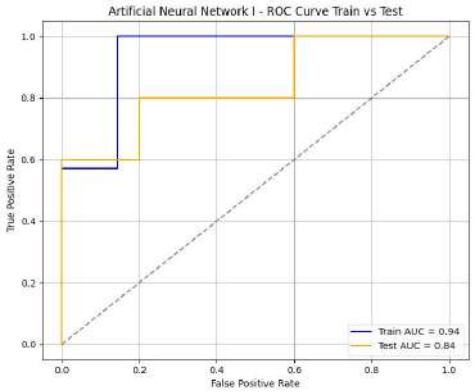


Fig. 4. ROC curves for Train and Test, ANN I.

3.2.4 Learning Curves and Training Dynamics

To better understand the training behavior and convergence of the models, learning curves where generated for each algorithm. These plots display the evolution of model performance with AUC-ROC as the score metric, this approach offers a deeper insight into the dynamics of the model, showing potential overfitting and optimization.

3.2.4.1 LR

The learning curve for the LR model (Fig. 5) shows that the training and validation accuracy curves converge at a stable point. The training AUC-ROC score is consistently high, while the validation score plateaus around 0.60. The gap between the two curves is relatively narrow, this suggests that the model is neither significantly overfitting nor underfitting, however, indicates that the model's performance is limited by the small dataset size.

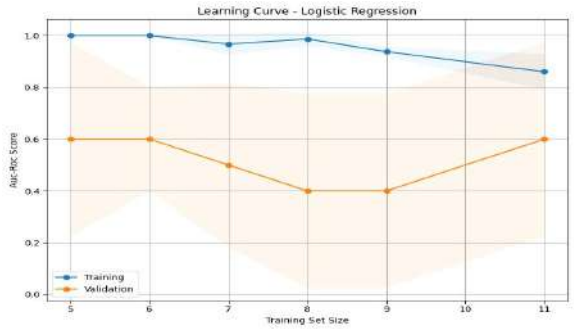


Fig. 5. Learning Curve for LR.

3.2.4.2 GNB

The learning curve for the GNB model (Fig.6) supports the diagnostic of poor generalization, whit the training ROC-AUC score near 1.0 indicating that the model is perfectly fitting the training data. Conversely, the validation score fluctuates significantly, suggesting a high variance. The large gap between the two curves is a clear sign of overfitting. This behavior is likely due to the model's simplicity and the limited size of the dataset.

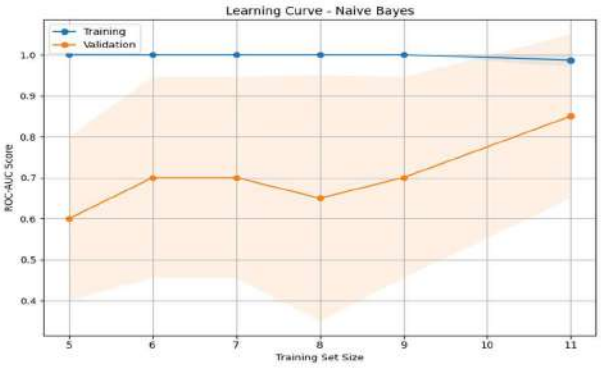


Fig. 6. Learning Curve for GNB.

3.2.4.3 RF

The RF learning curve (Fig.7) shows a very high training ROC-AUC score that remains near 1.0, perfectly fitting the training data, while the validation score remains considerably lower and more unstable. This wide gap is a strong indicator of overfitting. The model has learned the patterns and noise of the training data very precisely but struggles to generalize these learnings to the validation set. This suggests that the model's complexity is too high for the limited size of the dataset, capturing noise instead of meaningful underlying patterns.

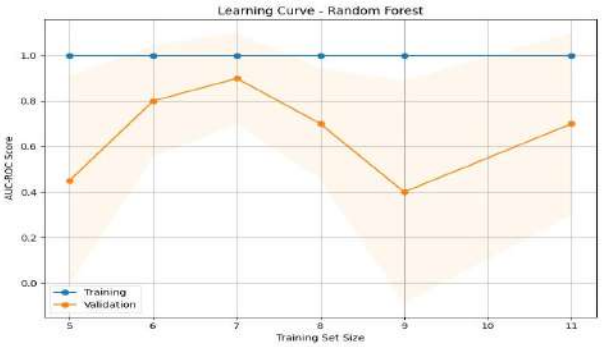


Fig. 7. Learning Curve for RF.

3.2.4.4 ANN

The learning curve for the ANN (Fig.8) displays the training and validation loss over 25 epochs. Initially, both losses decrease as the epochs increase. The model is still improving its fit on the training data (lowering the loss), but this comes at the cost of its ability to generalize, as the validation loss starts to rise. This indicates that the model is learning the noise in the training data.

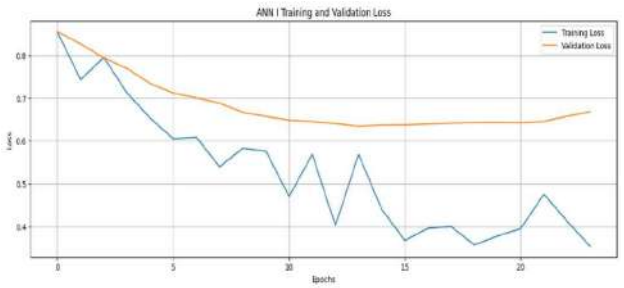


Fig. 8. Learning Curve for Artificial Neural Network

Overall, these visualizations support the quantitative results, confirming that ANN I and RL have learned robust patterns and successfully generalized, rather than overfitting to the training data.

3.2.5 Features' Relevance

The analysis of feature importance provided insights into the most influential variables for each model's predictions, revealing consistent patterns despite differences in the algorithms. The methods used to assess feature relevance were tailored to each model type: coefficient magnitude for LR, feature permutation for RF, and mutual information for GNB and ANN.

- LR: the variables with the strongest influence on predictions were sex, age, height and weight.
- GNB: the most influential characteristics identified were, initial LT4 dosage, age, sex, serum f-T3, and height.
- RF: the model considered Age, Serum TPO, and the ratio f-T3 / f-T4 before weight as most influential features.
- ANN: the most influential characteristics were feature_0 = sex, feature_11= Zulewski score, feature_1= age, feature_7 = TSH, feature_3=height, feature_2= weight, and feature_6= TPO.

Despite methodological differences, there is concordance among the models regarding the most determinant clinical factors for predicting euthyroid status. These characteristics, in addition to body weight, have a consistent predictive impact.

4. DISCUSSION

This study explored the capability of ML models and ANNs for classifying a future euthyroid status in patients with primary hypothyroidism undergoing LT4 therapy. Despite the constraints imposed by the limited dataset (n=24), the findings provide encouraging results, supporting the use of multifactorial predictive models in the personalized management of hypothyroidism.

4.1 Model Interpretation and Comparison

All models showed acceptable metric values yet differed significantly in their ability to generalize and maintain balanced sensitivity and specificity. Among them, the ANN demonstrated a consistent behavior between training and testing phases, indicating robust generalization capabilities without excessive overfitting. LR also showed consistent performance with minimal signs of overfitting, although its low sensitivity on the test set limits its clinical applicability.

In contrast, the RF and GNB models exhibited clear overfitting on their learning curves, confirmed as the high training performance showed considerable degradation in the test scores. These findings highlight the challenges of overfitting for these algorithms in clinical datasets, suggesting new approaches with stricter regularizations through a wider search for adequate hyper-parameters.

The ANN's ability to model complex non-linear interaction between features likely contributed to its superior performance, this is valuable in a clinical context where variables may be intricate and non-linear on most real-life cases.

While results are promising, they highlight the need for cautious interpretation and further validation.

4.2 Clinical Implications and Feature Relevance

The feature importance analyses revealed consistent patterns, with variable such as age, sex, height and initial hormone levels, emerging as key predictors of treatment response. Interestingly, body weight was not the most influential predictor for any model.

This supports the clinical value of personalized models integrating multiple variables, in contrast to the traditional weight-based approach. These findings align with prior studies (Ngan *et al.*, 2025), reinforcing their external validity.

4.3 Limitations and Future Work

The main limitation of this study was the small size of the clinical dataset, additionally, since the LT4 dosage was identified as a relevant feature by the RF and GNB models, and it is calculated based on patients' weight, there is potential for multicollinearity or confounding effects that could introduce noise or bias in the predictive patterns.

To address these limitations and further develop in this line of research, future work should focus on:

- Acquisition of more robust and diverse datasets.
- Exploration of advanced synthetic data generation techniques (e.g. Generative Adversarial Networks).
- Validation with clinical experts, ensuring that predictions are safe, ethical, and effective in a real-world environment.
- Development of dosage predictive models: This study focused on classifying euthyroid status. A natural extension would be to develop regression models capable of directly predicting the optimal levothyroxine dose for individual patients, which would be of greater clinical utility and open new avenues for personalized treatment.

5. CONCLUSIONS

This study explored the application of ML models and artificial ANNs to predict euthyroid status in hypothyroid patients undergoing LT4 treatment. Despite relying on a limited clinical dataset, the results demonstrate the potential of these methodologies to advance towards a more personalized approach in managing this condition.

Among the models evaluated ANN, exhibited the highest performance, showing stronger discriminative capacities. This suggests that neural architectures may be better suited for capturing complex, nonlinear relationships in small-scale clinical data.

Beyond model performance, the identification of clinically relevant predictors such as age, sex, hormonal profiles and autoimmune markers, underscores the limitations of the current weight-based dosing, reinforcing the value of individualized treatment strategies.

While the findings should be carefully interpreted due to the small sample size, future work should focus on validating these with larger and more diverse patient cohorts.

REFERENCES

Betts, J.G. *et al.* (2013) *Anatomy and Physiology*. 2nd ed. Houston: OpenStax.

Bjorck, J., Gomes, C. and Selman, B. (2018) "Understanding Batch Normalization," in. *Neural Information Processing Systems*, New York.

Blair, S. and Rushton, L. (2021) *The Endocrine System, Third Edition*. Infobase Holdings, Inc.

Blandine, B. (2022) "Application of the MissForest algorithm for imputation in the Sur- vey on Income and Living Conditions."

Breiman, L. (2001) "Random Forests," *Machine Learning*, 45(1), pp. 5–32.

Cortes, C. and Vapnik, V. (1995) "Support-vector networks," *Machine Learning*, 20(3), pp. 273–297.

Dhillon, A. and Singh, A. (2019) "Machine Learning in Healthcare Data Analysis: A Survey," *Journal of Biology and Today's World*, 8(6).

Funkquist, A. (2022) "Hypothyroidism Weight and serum thyroid hormones." Zenodo.

Funkquist, A. *et al.* (2023) "Higher CSF/serum free-T4 ratio is associated with improvement of quality of life during treatment with L-thyroxine," *Journal of Neuroendocrinology*, 35(5), p. e13272.

Ioffe, S. and Szegedy, C. (2015) "Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift," in. *In Proceedings of the 32nd International Conference on International Conference on Machine Learning*, pp. 448–456.

Japkowicz, N. and Shah, M. (2011) "Evaluating Learning Algorithms: A Classification Perspective."

Jonklaas, J. *et al.* (2014) "Guidelines for the Treatment of Hypothyroidism: Prepared by the American Thyroid Association Task Force on Thyroid Hormone Replacement," *Thyroid*, 24(12), pp. 1670–1751.

Karataş, S. and Hacıoğlu, Y. (2022) "Determinants of Levothyroxine Treatment in Patients with Hypothyroidism," *Cyprus Journal of Medical Sciences*, 7(5), pp. 593–596.

Mukaka, M. (2012) "A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research," *Malawi Medical Journal : The Journal of Medical Association of Malawi*, 24(3), pp. 69–71.

Ngan, T.T. *et al.* (2025) "Developing a machine learning-based predictive model for levothyroxine dosage estimation in hypothyroid patients: a retrospective study," *Frontiers in Endocrinology*, 16, p. 1415206.

Parlá Sardiñas, J. (2012) "Hipotiroidismo," *Revista Cubana de Endocrinología*, 23(3), pp. 208–212.

Pustilnik, E. *et al.* (2021) "The influence of age and body weight on levothyroxine replacement dosage to achieve euthyroidism in patients with primary hypothyroidism," *Endocrinología, Diabetes y Nutrición*, 68(8), pp. 542–547.

Santiago-Peña, L.F. (2020) "Fisiología de la glándula tiroides. Disfunción y parámetros funcionales de laboratorio en patología de tiroides," *Revista ORL*, 11(3), pp. 253–257.

Sarker, I.H. (2021) "Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions," *SN Computer Science*, 2(3), p. 160.

Shahid, N., Rappon, T. and Berta, W. (2019) "Applications of artificial neural networks in health care organizational decision-making: A scoping review," *PLOS ONE*. Edited by O. Uthman, 14(2), p. e0212356.

Stekhoven, D.J. and Bühlmann, P. (2012) "MissForest—non-parametric missing value imputation for mixed-type data," *Bioinformatics*, 28(1), pp. 112–118.

World Health Organization (2020) *Thyroid Dysfunctions: Global Prevalence and Public Health Challenges*. Geneva: WHO Publications.

Zhang, H. (2004) "The Optimality of Naive Bayes."

Zulewski, H. *et al.* (1997) "Estimation of Tissue Hypothyroidism by a New Clinical Score: Evaluation of Patients with Various Grades of Hypothyroidism and Controls1," *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 82(3), pp. 771–776.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Application of Industry 5.0 Technology in Water Conservation: Development of a Cross-Platform Educational App Using FlutterFlow and Expo Snack in a Marginalized High School Setting

Espinoza Romo, Verónica

Docente Centro de Bachillerato Industrial y de Servicios No. 282 / Docente Universidad Abierta y a Distancia de México (UnADM), (e-mail: veronica.espinoza.cb282@dgeti.sems.gob.mx / veronica.espinozaro@nube.unadmexico.mx).

Abstract: This article presents an educational experience in software design and development rooted in Industry 5.0 principles. It emphasizes sustainability and social well-being through human-machine collaboration. The proposal focuses on a cross-platform prototype application for water conservation, developed by upper secondary students in a marginalized high school setting. Accessible tools, such as FlutterFlow (an online platform that utilizes the Flutter framework and Dart) and Expo Snack (a tool based on React/React Native, utilizing HTML5, CSS, and JavaScript), guide the process. The project promotes the use of data science fundamentals to analyze, visualize, and reflect on responsible water consumption. Kanban methodology supports the process, encouraging organization, collaboration, and accountability. The project shows that technological innovation is achievable without expensive software or specialized infrastructure. It relies on online development environments accessible from conventional devices. This approach supports a comprehensive education that blends technology, sustainability, and equity, aligning with Industry 5.0.

Keywords: Industry 5.0, Data Science, FlutterFlow, React Native, Kanban, Sustainability, Water Conservation, Technological Education, Digital Inclusion.

1. INTRODUCCIÓN

La Tecnología 5.0 invita a reflexionar en la relación entre las personas y la tecnología. En esta evolución del concepto de conjunto de técnicas se va más allá de mecanizar procesos. En esta tendencia actual se gestiona que humanos y máquinas trabajen de manera conjunta y armónica para resolver problemas en la vida cotidiana, y aunque suene anacrónico por tratarse de máquinas, con un enfoque más humano, más sostenible y, por supuesto, más ético (Monopoli et al., 2025).

En el nivel medio superior técnico, y más específicamente en el bachillerato tecnológico, este enfoque se torna sustancialmente valioso porque al enseñar programación con los principios de la Tecnología 5.0 en mente, los estudiantes no solo aprenden a programar, sino que descubren cómo usar la tecnología para mejorar su entorno (muchas veces limitado por cuestiones económicas), además que reciben el aliciente para desarrollar ideas propias y en consecuencia consiguen el impulso necesario para colaborar en equipo (Tlili y Huang, 2025).

Normalmente consideramos que marginación y tecnología no están relacionadas, pero a pesar de que la Tecnología 5.0 es precisamente eso, un enfoque tecnológico de vanguardia se usa en la presente investigación para implementar enseñanza útil a estudiantes en una comunidad marginada de Aguascalientes, donde el acceso al agua es un tema apremiante.

Abordar esta problemática a través de proyectos tecnológicos permite que los estudiantes se involucren activamente y propongan soluciones desde su realidad, cerrando el círculo de los ideales de la evolución 5.0.

Para lograrlo, se utilizan herramientas accesibles como FlutterFlow y Expo Snack, que permiten crear aplicaciones sin necesidad de computadoras avanzadas ni licencias costosas. Estas plataformas, además de ser amigables para quienes están empezando, están alineadas con lo que se usa en el mundo laboral actual. Así, los estudiantes, además de desarrollar habilidades técnicas, fortalecen su perfil profesional, preparando su futuro laboral (Kolb, 2024; Tutt y Leonard, 2025).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Contexto

El Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios No. 282, conocido simplemente como CBTis 282 y perteneciente al subsistema de bachillerato mexicano Dirección General de Educación Tecnológica Industrial y de Servicios (DGETI, se encuentra ubicado en una zona de marginación en la Ciudad de Aguascalientes en la que confluyen varias colonias reconocidas por la CONAPO por encontrarse en esta situación, entre ellas Cartagena, Ex – Viñedos, La Ribera y el poblado rural, ahora absorbido por la mancha urbana, El Puertecito de la Virgen (CONAPO 2012).

Los habitantes en su vecindario enfrentan desafíos significativos como delincuencia, drogadicción, desempleo, entre otros. Pero son potencialmente graves aquellos desafíos relacionados con el acceso y uso responsable del agua. Este escenario afecta directamente a las comunidades cercanas, donde muchas familias deben recurrir a métodos alternativos para obtener agua, como el almacenamiento en tinacos o la

compra de pipas, lo que representa un gasto adicional y una preocupación constante. De acuerdo con el Modelo Integral de Aguas de Aguascalientes (MIAA), entre octubre de 2023 y junio de 2024 se distribuyeron más de 21 mil pipas en zonas con rezago hídrico, lo cual es un indicador del desabasto que se sufre (MIAA, 2024).

Lo que es más, en esta región, el acuífero del Valle de Aguascalientes presenta un déficit de disponibilidad media anual de agua subterránea, lo que evidencia una sobreexplotación crítica (CONAGUA, 2024).

En este contexto, el bachillerato tecnológico se convierte en un espacio estratégico para fomentar la conciencia ambiental y el desarrollo de soluciones tecnológicas accesibles que permitan contribuir de alguna forma al uso responsable y a la conservación del agua.

El proyecto se aplica en este semestre: septiembre – diciembre 2025, con los 41 estudiantes del grupo 3A de la especialidad de Técnico en programación, conformado por jóvenes adolescentes mixtos de entre 16 y 18 años, muestra representativa de los casi 500 estudiantes del plantel. Es relevante el que se trate de adolescentes, puesto que estos estudiantes se encuentran en una etapa formativa clave para adquirir competencias digitales, pensamiento crítico y compromiso social (Morduchowicz 2021).

2.2 Planteamiento de pregunta de investigación

A pesar de la creciente disponibilidad de herramientas digitales, los estudiantes en zonas marginadas enfrentan barreras para acceder a tecnologías avanzadas, lo que limita su participación en proyectos de innovación. Además, la falta de conciencia sobre el consumo responsable del agua en el entorno escolar y comunitario agrava la problemática ambiental.

¿Cómo pueden los estudiantes de nivel medio superior, con recursos limitados, diseñar y desarrollar una aplicación educativa multiplataforma que promueva el cuidado del agua en su comunidad, utilizando herramientas accesibles y alineadas con los principios de la Tecnología 5.0?

2.3 Justificación

La propuesta del presente proyecto se justifica por sí misma. Y dicha justificación gira en torno de tres dimensiones fundamentales:

- Educativa: Promueve el aprendizaje significativo mediante el desarrollo del pensamiento crítico y trabajo colaborativo, alineado con los programas vigentes de formación profesional del bachillerato técnico en la DGETI para la carrera de Técnico en Programación (Castañeda Fuentes et al. 2024; SEP-DGETI 2025).
- Tecnológica: Expone que es posible innovar utilizando plataformas accesibles como FlutterFlow y Snack de Expo, sin necesidad de infraestructura especializada ni licencias costosas lo cual es excelente desde el contexto del plantel y sus estudiantes (COSFAC – DGETI 2025).
- Social y ambiental: Contribuye a la concientización sobre el uso responsable del agua, involucrando a los estudiantes en la solución de una problemática real que afecta directamente a su comunidad (Rentería Álvarez 2022).

Este enfoque integral permite que los jóvenes se conviertan en agentes de cambio, utilizando la tecnología no solo como herramienta de desarrollo profesional, sino como medio para mejorar su entorno (Ribosa & Duran 2022).

2.4 Objetivos

2.4.1 General

Diseñar y desarrollar una aplicación educativa multiplataforma para el cuidado del agua en el entorno escolar y comunitario, utilizando herramientas accesibles como FlutterFlow y Snack de Expo, bajo los principios de la Tecnología 5.0.

1.4.2 Específicos

- Identificar las problemáticas relacionadas con el acceso y uso del agua en la comunidad del CBTis 282.
- Aplicar la metodología Kanban para organizar y gestionar el proceso de desarrollo del software.
- Utilizar FlutterFlow y Snack de Expo para crear un prototipo funcional de la aplicación con módulos para administrador y usuario.
- Integrar fundamentos de las Ciencias de Datos para visualizar y analizar el consumo de agua.
- Promover la conciencia ambiental y el uso responsable del agua entre estudiantes y miembros de la comunidad.
- Evaluar el impacto educativo y social del proyecto en el grupo participante.

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis General

Si los estudiantes de nivel medio superior desarrollan una aplicación educativa multiplataforma utilizando herramientas accesibles como FlutterFlow y Snack de Expo, entonces podrán promover el cuidado del agua en su comunidad, fortaleciendo sus competencias digitales y su conciencia ambiental.

2.5.2 Hipótesis Específicas

- Si se aplica la metodología Kanban en el proceso de desarrollo de software, entonces se mejorará la organización, la colaboración y la responsabilidad individual de los estudiantes durante el proyecto.
- Si se utilizan herramientas accesibles y sin costo como FlutterFlow y Snack de Expo, entonces los estudiantes podrán desarrollar soluciones tecnológicas funcionales sin necesidad de infraestructura especializada.
- Si los estudiantes participan activamente en el diseño de soluciones tecnológicas para su entorno, entonces se incrementará su sentido de pertenencia y compromiso con el cuidado del agua en su comunidad.
- Si se integran fundamentos de Ciencia y análisis de datos en la aplicación, entonces los usuarios podrán visualizar y reflexionar sobre el consumo de agua de manera más efectiva.

3. MARCO TEÓRICO

Primero se aborda el enfoque que enmarca el proyecto: La Tecnología 5.0.

A diferencia de la Tecnología 4.0, que se enfoca en automatizar y conectar sistemas, la 5.0 propone una colaboración activa entre humanos y máquinas, combinando la inteligencia artificial con la creatividad humana para enfrentar desafíos reales con sensibilidad social (Siddiqui, 2025). Este nuevo paradigma pone en el centro la humanización de la tecnología, promoviendo valores como la sostenibilidad, la inclusión y el bienestar colectivo (Pérez Domínguez 2024).

En este contexto, la educación técnica adquiere un papel estratégico, pues ya no se trata únicamente de formar programadores con capacidades y competencias de tipo laboral, sino de formar ciudadanos digitales capaces de usar la tecnología para transformar positivamente su entorno. Como señala Castañeda (2023, p. 115): "la sociedad 5.0 requiere de una ciudadanía con pensamiento computacional, capaz de comprender, participar y transformar su realidad mediante el uso ético de la tecnología". Esta visión refuerza el papel de la escuela como espacio de formación integral, donde el conocimiento técnico se vincula con la acción social.

Las aplicaciones educativas se convierten en un puente que conecta el conocimiento técnico y la acción social. Cuando los estudiantes diseñan y desarrollan aplicaciones para comunicar ideas, resolver problemas o compartir conocimientos, a la par que asumen un rol activo y reflexivo en su aprendizaje, los resultados en su desarrollo son evidentes (Carriazo et al. 2020).

Este enfoque participativo favorece la autonomía, la creatividad y el pensamiento crítico (Ribosa & Duran, 2022), y además fortalece la dimensión ética del uso de la tecnología al vincular el aprendizaje con las necesidades reales de su comunidad (Morales, 2023).

En esta misma línea de ideas, se establece que es absolutamente necesario concientizar a través de las Tecnologías 5.0 que uno de los problemas más urgentes en comunidades marginadas de Aguascalientes es el acceso al agua y el cuidado de este vital líquido. En muchas zonas, este recurso vital es escaso, y su gestión está marcada por desigualdades sociales y económicas. La sobreexplotación de acuíferos, la falta de infraestructura y la escasa cultura del uso responsable agravan la crisis hídrica (CONAGUA, 2024). En este escenario, involucrar a los estudiantes en proyectos tecnológicos orientados al cuidado y monitoreo del agua permite unir la educación técnica con la conciencia ambiental y la acción comunitaria.

Para llevar a cabo este ambicioso proyecto, se recurre a herramientas accesibles y gratuitas, que no requieren la instalación de software costoso ni equipos de alto rendimiento, lo cual es esencial en un bachillerato ubicado en zona de marginación: FlutterFlow y Expo Snack.

Herramientas en línea como FlutterFlow y Expo Snack permiten crear aplicaciones móviles directamente desde el navegador, reduciendo las barreras tecnológicas y económicas. FlutterFlow, basada en el framework Flutter y el lenguaje Dart, posibilita el desarrollo visual de aplicaciones sin necesidad de escribir grandes cantidades de código (Kolb y Kolb, 2018).

Por su parte, Expo Snack, sustentado en React Native, permite programar usando JavaScript, HTML y CSS en un entorno en línea intuitivo y colaborativo (Tutt y Leonard, 2025).

Estas herramientas democratizan el acceso al desarrollo de software y estimulan el aprendizaje práctico basado en el saber hacer y la experimentación.

Por otra parte, Kanban se presenta como la metodología ágil idónea para gestionar el trabajo en el presente proyecto (Anderson, 2010). Su aplicación en el aula permite que los estudiantes organicen sus tareas, colaboren de forma estructurada y aprendan a gestionar tiempos y prioridades. Una característica destacable de Kanban es el uso de tableros (Ahmad et al. 2013), y al emplear tableros físicos o digitales (como Trello o Notion) según esta metodología ágil, los estudiantes pueden identificar cuellos de botella, obligándolos a reflexionar sobre su progreso y adaptar sus estrategias de aprendizaje, fomentando la autorregulación y la cooperación, lo cual a su vez los prepara para la futura inserción laboral (Castañeda 2023).

Asimismo, integrar fundamentos de Ciencia de Datos en estos proyectos potencia la comprensión crítica de los fenómenos locales (Di Bartolo & Mora 2024).

Y finalmente, al analizar datos sobre el consumo de agua en sus hogares o escuelas, los estudiantes desarrollan competencias en estadística, pensamiento lógico y toma de decisiones basada en evidencia (Bhat, 2023).

Por ende, este enfoque interdisciplinario combina tecnología y educación y, lo más importante, busca la responsabilidad social, alineándose con los principios de la Tecnología 5.0: una tecnología humanista y sostenible.

3. METODOLOGÍA

En este proyecto confluyen diversas metodologías: de investigación, de desarrollo de proyectos, de programación, de análisis de resultados.

En primer lugar, la metodología de investigación se estructura y desarrolla bajo un enfoque mixto, combinando técnicas cuantitativas y cualitativas para evaluar el impacto del proyecto, bajo la línea de los instrumentos de recopilación de datos propuestos:

- Cualitativo: Se aplican encuestas con escala Likert para explorar las percepciones, actitudes y reflexiones de los estudiantes sobre el cuidado del agua y el uso de tecnología (Pereira Pérez, 2011; Creswell y Plano Clark, 2018).
- Cuantitativo: Se implementan métodos estadísticos como correlación de Pearson y regresión lineal múltiple para analizar la relación entre el uso de la aplicación y el nivel de conciencia ambiental, así

como para modelar el impacto educativo del proyecto (Lavalle et al., 2006; Junco et al., 2021).

La implementación de métodos estadísticos como la correlación de Pearson y la regresión lineal múltiple para analizar la relación entre el uso de la aplicación y el nivel de conciencia ambiental, así como para modelar el impacto educativo del proyecto, constituye una aplicación directa de los fundamentos de la Ciencia de Datos. Esta disciplina permite transformar datos en conocimiento útil mediante técnicas estadísticas, algoritmos y visualización, facilitando una comprensión crítica de los fenómenos locales y educativos (Di Bartolo & Mora, 2024).

Ahora bien, la ecuación de impacto propuesta es:

$$I = \alpha T + \beta C + \gamma A$$

Donde:

- I: Índice de impacto del proyecto.
- T: Nivel de desarrollo tecnológico.
- C: Nivel de conciencia ambiental.
- A: Nivel de apropiación del aprendizaje.
- α, β, γ: Coeficientes de ponderación definidos según los objetivos del estudio.

Por otra parte, este proyecto se desarrolla bajo un enfoque pedagógico que combina el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) y el Aprendizaje y Servicio (APS). Estas metodologías permiten vincular el conocimiento técnico con la acción social, al fomentar que los estudiantes participen activamente en la resolución de problemas reales de su comunidad. El ABP promueve la autonomía, la creatividad y el trabajo colaborativo (Ruiz Hidalgo y Ortega-Sánchez, 2022), mientras que el APS fortalece el compromiso ético y ciudadano del alumnado (Ochoa Cervantes et al., 2017).

La implementación del proyecto con el grupo de 3A de Técnico en programación del CBTis 282 permite contextualizar el aprendizaje en un entorno de marginación, donde el acceso a recursos tecnológicos es limitado. Por ello, se decide utilizar herramientas accesibles como FlutterFlow y Expo Snack, que permiten desarrollar aplicaciones directamente desde el navegador, sin necesidad de instalar software especializado (Bhat, 2023).

En cuanto a la metodología de desarrollo de software (programación), el proyecto se rige por el método Kanban (Anderson, 2010). En el contexto educativo, Kanban permite organizar tareas de forma clara y flexible, promoviendo la autorregulación, la colaboración y la mejora continua (GeeksforGeeks 2025). En lugar de seguir una planificación rígida, los estudiantes trabajan en ciclos cortos, moviendo tareas a través de columnas como “Por hacer”, “En proceso” y “Terminado”. Utilizar tableros digitales como Trello y Notion permite a los estudiantes gestionar sus actividades, colaborar en equipo y reflexionar sobre su progreso (Ahmad et al., 2013).

4. DESARROLLO DE METODOLOGÍA DE SOFTWARE APLICADA AL MODELADO DEL PROTOTIPO

La metodología Kanban se implementa como eje organizador del proceso de desarrollo de la aplicación educativa, permitiendo a los estudiantes visualizar, gestionar y reflexionar sobre su trabajo en tiempo real (Martins, 2025; Universidad José Vasconcelos, 2025; Castellano Lendínez, 2019)

Las fases del proyecto se estructuran de la siguiente manera:

1. Idear y diseñar Definir la problemática y estructurar la aplicación en módulos funcionales:

2. Desarrollar técnicamente: Dividir el desarrollo en dos líneas:

- Utilizar FlutterFlow para crear interfaces visuales y flujos básicos, ideal para estudiantes que inician en programación (Kolb y Kolb, 2018).
- Usar Expo Snack para programar con React Native, permitiendo mayor control sobre el código y funcionalidades avanzadas (Tutt y Leonard, 2025).

3. Integrar análisis de datos: Recolectar y visualizar información sobre el consumo de agua. Utilizar gráficos e indicadores para interpretar patrones y fomentar la reflexión crítica sobre el uso responsable del recurso (Bhat, 2023).

4. Probar y retroalimentar:Validar la aplicación en dispositivos móviles y navegadores. Realizar sesiones de retroalimentación con los estudiantes para ajustar funcionalidades, mejorar la experiencia de usuario y reforzar el aprendizaje colaborativo.

4.1. Planificación

En esta fase se define el alcance del proyecto, los roles de los participantes, los entregables y el cronograma de trabajo. Se establecen los módulos funcionales de la aplicación, los objetivos técnicos y pedagógicos, y se asignan tareas iniciales en el tablero Kanban (GeeksforGeeks 2025). Con este fin, se realiza una lluvia de ideas con el grupo para identificar necesidades locales relacionadas con el cuidado del agua (Pina Gadea, 2018)

4.2. Análisis

Se recopila información sobre el contexto del consumo de agua en el plantel y la comunidad. Se identifican los actores clave (usuarios, administradores, docentes) y se definen los requerimientos funcionales y no funcionales de la aplicación.

Se analizan los datos disponibles y se establecen criterios para la visualización y el análisis posteriores (Carriazo Díaz et al., 2020).

4.3. Diseño

4.3.1. Diseño de arquitectura

Se plantea una arquitectura modular basada en roles: administrador y usuario. La aplicación se estructura en componentes independientes que interactúan mediante flujos definidos. Se opta por una arquitectura cliente-servidor simplificada, aprovechando las capacidades de FlutterFlow y Expo Snack para el frontend y Firebase/Supabase como backend opcional (Escobar-Reynel et al., 2021; Rodríguez Morales y Blacio Matamoros, 2024).

4.3.2. Diseño de la base de datos

Se diseña un esquema de base de datos relacional con tablas para usuarios, roles, parámetros, catálogos, registros de consumo y reportes. Se definen las relaciones entre entidades y se normaliza la estructura para facilitar la consulta y visualización de datos (Ruíz Rivera et al., 2021)

4.3.3. Diseño de Frontend

Se crean prototipos visuales de las interfaces utilizando FlutterFlow, priorizando la accesibilidad y la experiencia de usuario. Se definen pantallas para login, dashboard, reportes, configuración y visualización de datos (Kolb y Kolb, 2018). En Expo Snack se programan componentes interactivos y funcionalidades avanzadas con React Native (nocodehackers.es, 2025; KeepCoding, 2025).

4.4. Desarrollo

4.4.1. Base de datos

Se implementa la estructura de la base de datos en Supabase, porque permite el acceso gratuito a una cuenta sin requerir de una tarjeta bancaria, como en el caso de Firebase, que aunque ofrece algunos servicios gratuitos, es obligatorio ingresar los datos de una tarjeta bancaria para su uso. En este servicio de Supabase se configuran reglas de seguridad, autenticación y almacenamiento de datos. De igual forma, se integran funciones para registrar y consultar información sobre el consumo de agua.

4.4.2. Codificación de las interfaces y elementos

Los estudiantes desarrollan las interfaces en FlutterFlow y Expo Snack, integrando formularios, botones, gráficos y componentes visuales. Se programan funciones para la gestión de usuarios, visualización de reportes y generación de alertas. Se aplican principios de diseño responsivo para asegurar compatibilidad en dispositivos móviles y navegadores (Blacio Matamoros y Rodríguez Morales, 2024)

4.5. Pruebas

4.5.1. Pruebas de caja negra

Se realizan pruebas funcionales sin conocer el código interno, verificando que cada módulo cumpla con los requerimientos definidos. Se evalúa la navegación, la entrada y salida de datos, y la respuesta de la aplicación ante diferentes escenarios de uso (Smartbrain.io, 2025; Reto, 2023).

Los estudiantes diseñan distintos escenarios que simulan el uso real de la aplicación por parte de usuarios comunes (administradores y estudiantes). Por ejemplo:

- Registro y acceso con credenciales válidas e inválidas.
- Navegación entre módulos (catálogos, reportes, tablero de información).
- Interacción con formularios y botones.
- Visualización de datos en tiempo real.

Se comprueba que los enlaces, menús y botones llevan al usuario al módulo correcto, sin errores de redirección ni pantallas en blanco.

Cada estudiante documenta los resultados de las pruebas en una tabla tipo checklist, indicando:

- Caso de prueba.
- Resultado esperado.
- Resultado obtenido.
- Observaciones y sugerencias de mejora.

4.5.2. Pruebas de caja blanca

Se revisa el código fuente en Expo Snack y en FlutterFlow para validar la lógica interna, estructuras de control, manejo de errores y eficiencia de los algoritmos. Los estudiantes analizan el flujo de ejecución y realizan ajustes para optimizar el rendimiento y la seguridad (Caos y Ciencia, 2025; ClickUp, 2024)

5. RESULTADOS

Una vez concluido el ciclo de desarrollo ágil aplicando Kanban, e decir, terminado el prototipo y efectuadas las pruebas de caja blanca y de caja negra, son aplicados los instrumentos de recopilación de información: encuestas tipo Likert para conocer la apreciación de los estudiantes participantes. Con afirmaciones como:

- FlutterFlow es fácil de usar para crear aplicaciones.
- La interfaz visual de FlutterFlow me ayudó a entender mejor la programación.
- Pude trabajar sin problemas desde el navegador sin instalar software.
- FlutterFlow me permitió colaborar con mis compañeros de forma efectiva
- Me gustaría seguir usando FlutterFlow en futuros proyectos.
- Expo Snack me ayudó a practicar programación con JavaScript.
- Pude ver los resultados de mi código en tiempo real.
- Expo Snack me permitió experimentar y aprender de mis errores.
- Me gustaría seguir usando Expo Snack en futuros proyectos.
- Comprendí mejor la lógica de programación usando FlutterFlow.
- Comprendí mejor la estructura del código usando Expo Snack.
- Ambas herramientas me ayudaron a desarrollar habilidades digitales.
- Me sentí motivado/a al ver que podía crear una app funcional.
- Este proyecto me ayudó a reflexionar sobre el cuidado del agua.

La escala usada es de 5 puntos:

- Totalmente en desacuerdo 1
- En desacuerdo 2
- Ni de acuerdo ni en desacuerdo 3
- De acuerdo 4
- Totalmente de acuerdo 5

Los datos recabados son analizados a través de los métodos estadísticos de Análisis de Correlación y Regresión Lineal Múltiple.

5.1 Análisis de Correlación

Objetivo: Evaluar la relación entre el uso de la aplicación (FlutterFlow y Expo Snack) y el nivel de conciencia ambiental. Variables analizadas:

- *Uso de la aplicación (T)*: promedio de ítems sobre facilidad de uso, interfaz visual, colaboración, práctica, resultados en tiempo real, etc.
- *Conciencia ambiental (C)*: ítem "Este proyecto me ayudó a reflexionar sobre el cuidado del agua".

Método aplicado: *Spearman*, ya que los datos no siguen una distribución normal.
Resultados:

- Coeficiente de correlación: 0.465
- p-valor: 0.0110 → *significativo*

Interpretación: Existe una correlación moderada y significativa entre el uso de la aplicación y la conciencia ambiental. Esto sugiere que quienes interactuaron más con las herramientas digitales también reflexionaron más sobre el cuidado del agua.

5.2 Regresión Lineal Múltiple

Objetivo: Determinar qué variables predicen el impacto educativo.

Variable dependiente (I): Índice de impacto educativo (promedio de motivación, habilidades digitales, comprensión de lógica y estructura de código, reflexión ambiental).

Variables independientes:

- T (tecnología): uso de FlutterFlow y Expo Snack.
- C (conciencia ambiental): ítem sobre reflexión ambiental.
- A (apropiación del aprendizaje): motivación, comprensión, deseo de seguir usando las herramientas

Modelo aplicado:

$$I = \beta 0 + \beta 1 * T + \beta 2 * C + \beta 3 * A + \varepsilon$$

Resultados:
$R^2 = 0.990$ → el modelo explica el *99%* de la variabilidad en el impacto educativo.
Coeficientes significativos**:**

- *C (conciencia ambiental):* coef = 0.2372, p < 0.001
- *A (apropiación):* coef = 0.6962, p < 0.001
- *T (tecnología):* coef = 0.0707, p = 0.153 → *no significativo*

Interpretación: El impacto educativo está fuertemente influenciado por la apropiación del aprendizaje y la conciencia ambiental. El uso de la tecnología por sí solo no predice significativamente el impacto, aunque sí contribuye.

6. CONCLUSIONES

En el contexto de marginación que rodea al CBTis 282, donde el acceso al agua es limitado y la conciencia ambiental aún se encuentra en proceso de formación, este proyecto demostró que es posible generar impacto educativo significativo mediante el uso de tecnologías accesibles y alineadas con los principios de la Tecnología 5.0.

La implementación de una aplicación multiplataforma para el cuidado del agua, desarrollada por estudiantes de entre 16 y 18 años con herramientas como FlutterFlow y Expo Snack, permitió no solo el desarrollo de competencias digitales, sino también la reflexión crítica sobre el entorno hídrico local. Esto responde directamente a la pregunta de investigación, al *mostrar que sí es posible diseñar soluciones tecnológicas educativas desde contextos con recursos limitados,* promoviendo el bienestar social y la sostenibilidad.

Los resultados cuantitativos refuerzan esta afirmación:

- La correlación significativa entre el uso de la aplicación y la conciencia ambiental ($\rho = 0.465$, $p = 0.011$) indica que la tecnología, cuando se vincula con problemáticas reales, puede fomentar actitudes responsables en los estudiantes.

- El modelo de regresión lineal múltiple reveló que el impacto educativo está fuertemente determinado por la apropiación del aprendizaje (coef = 0.6962) y la conciencia ambiental (coef = 0.2372), más que por el uso técnico de la tecnología (coef = 0.0707, no significativo). Esto sugiere que el aprendizaje significativo ocurre cuando los estudiantes se sienten motivados, comprendidos y comprometidos con su entorno.

Además, se demuestra que el uso de la metodología Kanban facilita la organización y colaboración entre los estudiantes, fortaleciendo su sentido de responsabilidad individual y colectiva.

El proyecto demuestra que la innovación educativa no requiere infraestructura especializada, sino una visión pedagógica que integre tecnología, sostenibilidad y equidad.

Igualmente, en el contexto de marginación que rodea al CBTis 282, donde el acceso al agua es limitado y la conciencia ambiental aún se encuentra en proceso de formación, este proyecto demostró que es posible generar un impacto educativo significativo mediante el uso de tecnologías accesibles como FlutterFlow y Expo Snack, alineadas con los principios de la Tecnología 5.0. Esta accesibilidad tecnológica permitió a los estudiantes desarrollar soluciones reales sin depender de infraestructura especializada ni licencias costosas. Además, el enfoque pedagógico que combina el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) y el Aprendizaje y Servicio (APS) fue clave para vincular el conocimiento técnico con la acción social. Mientras el ABP fomenta la autonomía, la creatividad y el trabajo colaborativo (Ruiz Hidalgo y Ortega-Sánchez, 2022), el APS fortalece el compromiso ético y ciudadano del alumnado (Ochoa Cervantes et al., 2017), permitiendo que los

estudiantes se involucren activamente en la resolución de problemáticas que afectan directamente a su comunidad.

En suma, esta experiencia representa un modelo replicable para otros contextos educativos similares, donde la formación integral de los estudiantes puede ser potenciada mediante el uso estratégico de herramientas digitales accesibles, promoviendo el desarrollo de soluciones reales a problemas comunitarios urgentes como el cuidado del agua.

Aunque el uso de la tecnología fue parte central del proyecto, los resultados estadísticos indican que no fue un predictor significativo del impacto educativo. Esto abre la oportunidad para profundizar en estrategias pedagógicas que vinculen más estrechamente el uso técnico con la reflexión y apropiación del aprendizaje, como el diseño centrado en el usuario o el aprendizaje basado en retos. Y desde luego, abre la puerta a extender este proyecto y a realizar nuevas investigaciones.

Finalmente, aunque el prototipo fue funcional y bien recibido por los estudiantes, se podría realizar una validación externa con usuarios reales de la comunidad para evaluar su usabilidad, pertinencia y potencial de impacto social.

REFERENCIAS

Ahmad, M.O., Markkula, J. & Oivo, M. (2013). Kanban in software development: A systematic literature review. 39th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications. doi:10.1109/SEAA.2013.28. Available at: https://sci-hub.se/10.1109/SEAA.2013.28

Anderson, D.J. (2010) Kanban: Successful evolutionary change for your technology business. Sequim: Blue Hole Press. Available at: https://personalpages.bradley.edu/~young/CS690S117old/Kanban.pdf

Bazal, M.A., Mohammed, F., Baarimah, A.O., Alawi, G., Al-Mekhlafi, A.A. and Almuhaya, B. (2024) 'The era of Industry 5.0: An overview of technologies, applications, and challenges', Advances in Intelligent Computing Techniques and Applications, pp. 274–284. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-59707-7_24

Bhat, M. (2023) Data literacy in secondary education: A practical approach. Available at: https://www.researchgate.net/publication/369874512

Carriazo Díaz, C., Pérez Reyes, M. & Gaviria Bustamante, K. (2020). Planificación educativa como herramienta fundamental para una educación con calidad. Utopía y Praxis Latinoamericana, 25(Esp.3), pp. 87–95. doi:10.5281/zenodo.3907048. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=27963600007

Castañeda, A.M. (2023) 'Pensamiento computacional para una sociedad 5.0', Revista Tecnología, Ciencia y Educación, pp. 111–140. Available at: https://www.tecnologia-ciencia-educacion.com/index.php/TCE/article/view/1440

Castañeda Fuentes, J.G., Pinto Ayala, B.E. y Sojos Tubay, A.M. (2024). Fomentando el pensamiento crítico mediante aprendizaje colaborativo y cooperativo: estrategias para mejorar la enseñanza. Revista Scientific, 9(31), pp.126–143. Disponible en: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2542-29872024000100126

Castellano Lendínez, L. (2019). Kanban. Metodología para aumentar la eficiencia de los procesos. 3c Tecnología: glosas de innovación aplicadas a la pyme, 8(1), pp. 30–41. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6866058

CONAGUA (2024) Disponibilidad por acuíferos en Aguascalientes. Comisión Nacional del Agua. Available at: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/aguascalientes/ac.html

Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2012). Índice de marginación por localidad 2010. Primera edición. México: CONAPO. Disponible en: http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/indices_margina/2010/documentoprincipal/Capitulo01.pdf [www.conapo.gob.mx]

COSFAC-DGETI (2025). Programa de Innovación e Investigación Tecnológica y Educativa. Secretaría de Educación Pública. Disponible en: https://cosfac.sems.gob.mx/pa_innovacion.php [cosfac.sems.gob.mx]

Creswell, J.W. & Plano Clark, V.L. (2018). Designing and Conducting Mixed Methods Research. 3rd ed. Thousand Oaks, CA: SAGE. Available at: https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2697821

Di Bartolo, F. & Mora, B. (2024). Ciencia de Datos: definición, aplicaciones y recursos. Banco Interamericano de Desarrollo. Disponible en: https://blogs.iadb.org/conocimiento-abierto/es/ciencia-de-datos/

GeeksforGeeks (2025). What is Kanban - Principles and Implementation. Disponible en: https://www.geeksforgeeks.org/software-engineering/what-is-kanban/ [www.geeksf...rgeeks.org]

Junco, E.E.P., Orozco, G.M.F., Moreno, G.E.M., Gómez, G.M.B. & Mantilla, S.N.E. (2021). Diseño de un modelo de regresión lineal múltiple para predecir el rendimiento de estudiantes de institutos superiores tecnológicos públicos frente a la nueva normalidad. European Scientific Journal, 17(2), pp. 30–45. doi:10.19044/esj.2021.v17n2p30.

Kolb, D.A. and Kolb, A.Y. (2018) 'Eight important things to know about the experiential learning cycle', Advances in Experiential Learning, 40(3), pp. 40–45. Available at: https://www.researchgate.net/publication/330993292

Lavalle, A.L., Micheli, E.B. & Rubio, N. (2006). Análisis didáctico de regresión y correlación para la enseñanza media. Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa, 9(3), pp. 383–406. https://www.redalyc.org/pdf/335/33590304.pdf

Manopiniwes, W., Chernbumroong, S. and Tutko, M. (2025) 'An engineering education 5.0: Creating holistic environment with EPR and AI', Manufacturing 2030 – A Perspective to Future Challenges in Industrial Production, pp. 138–145. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-032-03722-0_12

Márquez Delgado, D.L., Hernández Santoyo, A., Márquez Delgado, L.H. & Casas Vilardell, M. (2021). La educación ambiental: evolución conceptual y metodológica hacia los objetivos del desarrollo sostenible. Universidad y Sociedad, 13(2), pp. 301–310. Disponible en: http://www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2218-36202021000200301

Martins, J. (2025). ¿Qué es la metodología Kanban y cómo funciona? Asana. Disponible en: https://asana.com/es/resources/what-is-kanban

MIAA - Modelo Integral de Aguas de Aguascalientes (2024). Informe de avance de gestión financiera primer trimestre 2024. Disponible en: https://www.miaa.mx

Monopoli, A., Nahavandi, S. & Carro Suárez, J. (2025). Industry 5.0: A human-centric solution. MDPI. https://scholar.harvard.edu/saeid-nahavandi/classes/industry-50%E2%80%94-human-centric-solution

Morduchowicz, R. (2021). Competencias y habilidades digitales. Montevideo: UNESCO Oficina Regional de Ciencias para América Latina y el Caribe. Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380113.locale=en

NocodeHackers (2025). Cursos No-Code e IA GRATIS en Español. Disponible en: https://www.nocodehackers.es

Ochoa Cervantes, A. & Pérez Galván, L.M. (2017). El aprendizaje-servicio (APS) como estrategia para educar en ciudadanía. Alteridad. Revista de Educación, 12(2), pp. 175–187. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=467751871004

Pereira Pérez, Z. (2011). Los diseños de método mixto en la investigación en educación: una experiencia concreta. Revista Electrónica Educare, 15(1), pp. 15–29. Disponible en: https://www.redalyc.org/pdf/1941/194118804003.pdf [www.redalyc.org]

Pérez-Domínguez, L.A. (2024). Las principales tecnologías de la era de la Industria 5.0. Revista Ingenio, 21(1), pp. 60–70. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9600706.pdf

Rentería Álvarez, A. (2022). Proyecto socioformativo de concientización del cuidado del agua. Universidad Virtual del Estado de Guanajuato. Disponible en: https://www.academia.edu/91044509/proyecto_socioformativo_de_concientizaci%C3%B3n_del_cuidado_del_agua

Ribosa, J. and Duran, D., (2022). Do students learn what they teach when generating teaching materials for others? A meta-analysis through the lens of learning by teaching. Educational Research Review, 37, p.100475.

Ruiz Hidalgo, D. & Ortega-Sánchez, D. (2022). El aprendizaje basado en proyectos: una revisión sistemática de la literatura (2015–2022). Human Review. Revista Internacional de Humanidades, 11(6), pp. 1–14. Disponible en: https://philpapers.org/rec/HIDABE

SEP-DGETI (2025). Dirección General de Educación Tecnológica Industrial. Secretaría de Educación Pública. Disponible en: https://www.gob.mx/sep/acciones-y-programas/direccion-general-de-educacion-tecnologica-industrial-dgeti

Siddiqui, A. (2025). Industry 5.0: A Human-Centered Paradigm for Sustainable and Resilient Production. Revista Innovaciones de Negocios, 22(44), pp. 71–96. Universidad Autónoma de Nuevo León. Disponible en: https://revistainnovaciones.uanl.mx/index.php/revin/article/download/481/516/1975

Tlili, A. & Huang, R. (2025). Educación 5.0: tecnología al servicio del aprendizaje humano. Innovaciones Educativas, 26(spe1), pp. 88–101. Disponible en: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-41322024000300088

Tutt, J. & Leonard, M. (2025). CS50's Mobile App Development with React Native. Available at: https://cs50.harvard.edu/mobile

Turesky, E.F. and Wood, D.R. (2010) Kolb's experiential learning as a critical frame for reflective practice', Academic Leadership: The Online Journal, 8(3). Available at: https://www.researchgate.net/publication/288376815

Universidad José Vasconcelos. (2025). Agilidad en el aula: aplicando Scrum, Kanban y metodologías ágiles a tus proyectos. Disponible en: https://universidadjosevasconcelos.mx/2025/02/12/agilidad-en-el-aula-aplicando-scrum-kanban-y-metodologias-agiles-a-tus-proyectos/

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Autonomous Navigation System with Computer Vision and Fuzzy Logic for Mobile Robots using ESP32-CAM

Rosa Adriana Jiménez López, José Federico Ramírez Cruz, Blanca Estela Pedroza Méndez, Yesenia Nohemí González Meneses, Beatriz Lorenzana Flores.

Tecnológico Nacional de Mexico/Apizaco, Av. Instituto Tecnológico s/n. Conurbado Tzompantepec, 90300, Apizaco, Tlaxcala. Mexico (e-mail:M24370001, federico.rc, blanca.pm, yesenia.gm, M23370043@apizaco. tecnm. mx).

Abstract: This work presents an obstacle avoidance systern for differential rnobile robots using the ESP32-CAM platforrn with cornputer vision and fuzzy logic control. Unlike rnulti-sensor approaches, it relies exclusively on visual processing for obstacle detection and navigation. A lightweight fuzzy inference systern processes object size, position, and optical flow to generate motor cornrnands, with algorithrns optirnized for resource-constrained environrnents. Experimental results dernonstrate a 94.3% success rate, 180 rns response time, and 185 rnA power consurnption. This vision-only approach reduces hardware cornplexity and cost while rnaintaining comparable performance, showing significant potential for IoT and edge cornputing applications.

Keywords: Cornputer vision, fuzzy logic, obstacle avoidance, ernbedded systerns, IoT robotics.

1. INTRODUCCIÓN

La integración de visión por computadora con control de lógica difusa en sistemas embebidos con restricciones de recursos representa un desafío significativo en robótica autónoma. Los sistemas tradicionales de evitación de obstáculos dependen de múltiples sensores (ultrasónicos, LIDAR, infrarrojos) para proporcionar mediciones confiables de distancia. Sin embargo, estos enfoques rnulti-sensor incrementan la complejidad del sistema, costo y consumo energético, limitando su aplicabilidad en plataformas robóticas de bajo costo.

La plataforma ESP32-CAM ofrece una oportunidad única para desarrollar sistemas de navegación basados únicamente en visión debido a su módulo de cámara integrado, procesador de doble núcleo y capacidades WiFi, todo dentro de un factor de forma compacto y económico. Este microcontrolador cuenta con un procesador Xtensa LX6 de 240 MHz con 520 KB SRAM, haciéndolo adecuado para aplicaciones ligeras de visión por computadora mientras mantiene los requisitos de control en tiempo real.

Esta investigación aborda tres preguntas fundamentales:

- ¿Puede un sistema de control difuso basado únicamente en visión lograr desempeño confiable de evitación de obstáculos comparable a enfoques rnulti-sensor?
- ¿Cómo pueden gestionarse efectivamente las restricciones computacionales mientras se mantiene el desempeño en tiempo real?
- ¿Qué ventajas técnicas y económicas proporciona este enfoque simplificado para sistemas embebidos?

2. TRABAJOS RELACIONADOS Y FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Visión por Computadora en Sistemas con Restrícciones de Recursos

Los avances recientes en visión por computadora embebida han habilitado procesamiento sofisticado de imágenes en plataformas de microcontroladores. El ESP32-CAM, equipado con su módulo de cámara OV2640 capaz de resolución 1600x1200, proporciona calidad de imagen suficiente para aplicaciones de detección de obstáculos (Espressif Systerns, 2025). Sin embargo, las limitaciones de memoria (520 KB SRAM total, con aproximadamente 200 KB disponibles para procesamiento de imágenes) requieren optimización cuidadosa de algoritmos y estructuras de datos.

La implementación de sistemas de inteligencia artificial embebida en el ESP32 presenta desafíos significativos relacionados con la integración a nivel de sistema de inferencia de IA, interacción basada en web y control de sensores dentro de severas restricciones de hardware (Chang et al., 2025). Para abordar estos desafíos, se han desarrollado arquitecturas híbridas borde-nube, donde el dispositivo de borde realiza procesamiento inicial y la nube maneja tareas cornputacionalrnente más intensivas, optimizando tanto latencia corno precisión.

Los algoritmos de detección de bordes corno Canny y Sobel han sido implementados exitosamente en plataformas de microcontroladores con recursos limitados, aunque con

resolución reducida para gestionar la carga computacional. La estimación de flujo óptico, tradicionalmente intensiva computacionalmente, puede aproximarse usando métodos dispersos con mejoras significativas de desempeño en sistemas embebidos.

2.2 Lógica Difusa para Control Basado en Visión

Los sistemas de lógica difusa sobresalen en el procesamiento de información visual incierta e imprecisa, haciéndolos ideales para aplicaciones de visión por computadora donde las mediciones exactas son difíciles de obtener. El concepto de lógica difusa fue introducido por Zadeh (1965), inspirado en el razonamiento humano, y los sistemas difusos pueden manejar incertidumbre e información imprecisa utilizando reglas lingüísticas.

La integración de lógica difusa con visión por computadora ha mostrado resultados prometedores en robótica móvil, siendo ampliamente utilizada para navegación de robots móviles debido a su capacidad de ofrecer inferencia usando datos ambientales, incluso bajo incertidumbres de movimiento y sensores (Faisal et al., 2013). Los controladores de lógica difusa han demostrado ser efectivos para gestionar la navegación autónoma en entornos desconocidos, permitiendo a los robots móviles evitar obstáculos de manera adaptativa utilizando reglas basadas en conocimiento experto (Khairudin et al., 2020; Tseng et al., 2020).

Una revisión del progreso de investigación sobre métodos de evitación local de obstáculos para robots móviles con ruedas bajo entornos complejos desconocidos muestra que los métodos inteligentes de evitación de obstáculos basados en algoritmos genéticos, redes neuronales y lógica difusa están recibiendo atención convincente para lograr libre colisión de robots móviles en entornos dinámicos (Zhong et al., 2023).

2.3 Cínemática de Tracción Diferencial

La configuración de tracción diferencial permite maniobras precisas mediante control independiente de las velocidades de las ruedas izquierda y derecha. Los robots de tracción diferencial tienen dos ruedas, cada una accionada independientemente, donde la cinemática directa se puede calcular a partir del modelo considerando que las ruedas en la izquierda y derecha pueden girar independientemente. La cinemática del robot diferencial se describe mediante las ecuaciones:

$$v = \frac{v_L + v_R}{2} \tag{1}$$

donde v es la velocidad lineal del robot.

$$w = \frac{v_R - v_L}{L} \tag{2}$$

donde v_L y v_R son las velocidades de las ruedas izquierda y derecha respectivamente, L es la distancia entre ruedas, v es la velocidad lineal y w es la velocidad angular del robot.

Asumiendo que las ruedas están en todo momento en contacto con el suelo (no hay deslizamiento), las ruedas describen arcos en el plano de tal manera que el vehículo siempre rota alrededor de un punto, referido como ICR (centro instantáneo de rotación). La cinemática inversa permite determinar las velocidades de las ruedas requeridas para lograr velocidades lineales y angulares deseadas del robot.

3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA Y METODOLOGÍA

3.1 Especificaciones de Hardware

Tarjeta de Desarrollo ESP32-CAM:

- Microcontrolador: ESP32-S (doble núcleo 240 MHz, 520 KB SRAM, 4 MB Flash)
- Cámara: OV2640 (2 MP, resolución UXGA, compresión JPEG)
- Interfaces: UART, SPI, I2C, PWM
- Consumo energético: 160 mA (activo), 10 μA (sueño profundo)

Sistema de Control de Motores:

- Driver de motor: Puente H L298N
- Motores: Motores DC 6 V con reducción (200 RPM, torque 1.2 kg-cm)
- Configuración de ruedas: Tracción diferencial 2WD
- Distancia entre ruedas: 15 cm, diámetro de rueda: 6.5 cm

3.2 Pipeline de Visión por Computadora

Adquisición de Imagen y Preprocesamiento. El pipeline de visión opera a resolución 320 x 240 para equilibrar requisitos computacionales con precisión de detección. La configuración de la cámara se implementa de la siguiente manera:

```
camera_config_t config;
config.pixel_format =
  PIXF0RMAT_GRAYSCALE;
config.frame_size = FRAMESIZE_QVGA;
config.jpeg_quality = 12;
config.fb_count = 1;
```

Pasos de preprocesamiento:

(1) Desenfoque gaussiano: Kernel 3 x 3 para reducción de ruido
(2) Ecualización de histograma: Mejorar contraste en iluminación variable
(3) Región de interés (ROI): Enfoque en 2/3 inferiores de imagen para obstáculos a nivel del suelo

Algoritmo de Detección de Obstáculos. El algoritmo de detección de obstáculos combina detección de bordes con filtrado basado en tamaño:

```
void detect□bstacles(uint8_t* image,
    0bstacle obstacles[], int* count) {
  // Detección de bordes Canny con
  // umbrales optimizados
  cannyEdgeDetection(image, 50, 150);

  // Etiquetado de componentes conectados
```

```
  int components =
      findConnectedComponents(image);

  // Filtrado por tamaño y posición
  *count = 0;
  for(int i = 0; i < components; i++) {
    if(componentArea[i] > MIN_OBSTACLE_SIZE &&
       componentArea[i] < MAX_OBSTACLE_SIZE) {
      obstacles[*count].x =
          componentCenterX[i];
      obstacles[*count].y =
          componentCenterY[i];
      obstacles[*count].size =
          componentArea[i];
      (*count)++;
    }
  }
}
```

Estimación de Distancia a partir de Pistas Visuales. La estimación de distancia utiliza la relación entre el tamaño del objeto en píxeles y la distancia del mundo real:

$$\text{distancia} = \frac{\text{altura real objeto x longitud focal}}{\text{altura píxeles objeto}} \quad (3)$$

Para el ESP32-CAM con cámara OV2640:

- Longitud focal: aproximadamente 3.6 mm
- Campo de visión vertical: 54°
- Calibrado para obstáculos cilíndricos: 010 cm, altura 20 cm

3.3 Diseño del Controlador de Lógica Difusa

Variables de Entrada. La asignación de términos lingüísticos y funciones de membresía para cada conjunto difuso de las variables de entrada, corresponde a las siguientes:

(1) Distancia (píxeles)
- Universo de discurso: [20, 200]
- Términos lingüísticos: Muy Cerca, Cerca, Media, Lejos, Muy Lejos
- Función de membresía: Trapezoidal/Gaussiana

(2) Posición Lateral (píxeles)
- Universo de discurso: [-160, 160]
- Términos lingüísticos: Izquierda, Centro-lzq, Centro, Centro-Der, Derecha
- Función de membresía: Gaussiana

(3) Tamaño Obstáculo ($píxeles^2$)
- Universo de discurso: [100, 5000]
- Términos lingüísticos: Pequeño, Mediano, Grande
- Función de membresía: Trapezoidal

Variables de Salida. En la asignación de términos lingüísticos y funciones de membresía para cada conjunto difuso las variables de salida se encuentran:

(1) Velocidad Lineal (PWM)
- Universo de discurso: [0, 255]
- Términos lingüísticos: Parar, Lento, Medio, Rápido
- Tipo de función: Trapezoidal

(2) Velocidad Angular (diferencia PWM)
- Universo de discurso: [-127, 127]
- Términos lingüísticos: Giro Brusco Izquierda, Izquierda, Recto, Derecha, Giro Brusco Derecha
- Tipo de función: Trapezoidal

Base de Reglas Difusa. La base de reglas consiste en 25 reglas cubriendo escenarios de evitación de obstáculos:

- R1: SI Distancia es Muy Cerca Y Posición es Centro ENTONCES Vel Lineal es Parar Y Vel Angular es Giro Brusco Izq
- R2: SI Distancia es Cerca Y Posición es Izquierda ENTONCES Vel Lineal es Lento Y Vel Angular es Derecha
- R3: SI Distancia es Media Y Posición es Centro ENTONCES Vel Lineal es Medio Y Vel Angular es Recto

⋮

- R25: SI Distancia es Lejos ENTONCES Vel Lineal es Rápido Y Vel Angular es Recto

Inferencia Difusa Optimizada. Para cumplir restricciones de tiempo real, el sistema de inferencia difusa utiliza funciones de pertenencia pre-computadas y defuzzificación simplificada:

```
typedef struct {
  float membership[MAX_TERMS];
  uint8_t active_rules[MAX_RULES];
  uint8_t rule_count;
} FuzzyState;

float fastCentroidDefuzz(float* values,
    float* weights, int count) {
  float num = 0, den = 0;
  for(int i = 0; i < count; i++) {
    num += values[i] * weights[i];
    den += weights[i];
  }
  return (den > 0) ? num / den : 0;
}
```

3.4 Optimización de Desempeño en Tiempo Real

Gestión de Memoria. La RAM limitada del ESP32-CAM requiere asignación cuidadosa de memoria:

- Buffer de imagen: 320 x 240 = 76.8 KB (escala de grises)
- Buffers de procesamiento: 2 x 76.8 KB para pipeline de detección de bordes
- Sistema difuso: menos de 2 KB para funciones de pertenencia y reglas
- Total aproximado: 155 KB de 200 KB SRAM disponible

Cronometraje del Pipeline de Procesamiento. En la Tabla 1 se muestran valores obtenidos de la medición del uso de memoria y tiempo de ejecución de los procesos en la ESP32-CAM.

Esto logra aproximadamente 7.7 FPS de tasa de procesamiento, adecuado para evitación de obstáculos a velocidades típicas de robot (0.2-0.5 m/s).

Tabla 1. Recursos de memoria utilizados en cada operación

Operación	Tiempo (ms)	Memoria (KB)
Captura de imagen	45 ± 5	77
Preprocesamiento	25 ± 3	154
Detección de bordes	35 ± 4	154
Detección de obstáculos	15 ± 2	156
Inferencia difusa	8 ± 1	158
Control de motores	2 ± 1	158
Ciclo total	130 ± 8	158

4. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL Y VALIDACIÓN

4.1 Configuración del Entorno de Prueba

4.2 Configuración Física

- Área de prueba: Ambiente interior 3 m x 3 m con iluminación controlada (400-600 lux).
- Obstáculos: Objetos cilíndricos (diámetro 8-12 cm, altura 15-25 cm) en varios colores.
- Superficie: Loseta con textura uniforme y resistencia adecuada para maniobras del robot.
- Iluminación: Paneles LED proporcionando iluminación uniforme.

4.3 Métricas de Desempeño

- Tasa de Éxito: Porcentaje de maniobras exitosas de evitación de obstáculos.
- Tiempo de Respuesta: Tiempo desde detección de obstáculo hasta inicio de acción evasiva.
- Eficiencia de Ruta: Relación entre longitud de ruta real y ruta óptima.
- Consumo Energético: Consumo promedio de corriente durante operación.
- Confiabilidad de Procesamiento: Consistencia del desempeño del pipeline de visión.

4.4 Análisis Comparativo: Solo Visión vs Multi-Sensor

Para validar el enfoque únicamente visual, se condujeron pruebas comparativas contra un sistema híbrido combinando ESP32-CAM con sensores ultrasónicos HC-SR04.

Tabla 2. Valores obtenidos de experimentos realizados bajo condiciones controladas

Métrica	Solo Visión	Visión+ US
Tasa de Éxito	94.3 ± 3.1%	97.2 ± 2.4%
Tiempo Respuesta	180 ± 25 ms	140 ± 20 ms
Eficiencia Ruta	85.2 ± 8.4%	88.7 ± 6.1%
Consumo Energético	185 ± 15 mA	195 ± 18 mA
Costo Componentes	$800	$1100
Rango Detección	0.5-3.0 m	0.3-4.0 m

4.5 Pruebas de Robustez

La variación de condiciones de iluminación en las pruebas conducidas bajo diferentes niveles muestran los siguientes resultados:

- Iluminación brillante (800-1000 lux): 96.1% tasa de éxito
- Iluminación normal (400-600 lux): 94.3% tasa de éxito
- Iluminación tenue (100-200 lux): 87.8% tasa de éxito
- Iluminación variable: 91.5% tasa de éxito

4.6 Pruebas de Diversidad de Obstáculos

Tabla 3. Resultados de pruebas por tipo de obstáculo

Tipo	Éxito	Notas
Cilíndrico (blanco)	96.2%	Objetos de prueba base
Cilíndrico (negro)	89.4%	Detección de contraste re- <lucido
Cajas rectangulares	92.8%	Bordes agudos ayudan detección
Formas irregulares	88.1%	Confianza de detección variable
Obstáculos móviles	85.7%	Efectos de desenfoque de movimiento

5. DESAFÍOS DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA Y SOLUCIONES

5.1 Gestión de Memoria en Entornos Restringidos

Los 520 KB SRAM del ESP32-CAM presentan desafíos significativos para aplicaciones de visión por computadora. Se desarrollaron estrategias efectivas de gestión de memoria:

Asignación Dinámica de Buffers:

```
// Estrategia optimizada de
// asignación de memoria
class ImageProcessor {
private:
  uint8_t* primary_buffer;
  // 76KB imagen cruda
  uint8_t* secondary_buffer;
  // 76KB imagen procesada
  bool buffer_swap_flag;

public:
  void initializeBuffers() {
    primary_buffer = (uint8_t*)
      heap_caps_malloc(IMAGE_SIZE,
        MALLOC_CAP_SPIRAM);
    secondary_buffer = (uint8_t*)
      heap_caps_malloc(IMAGE_SIZE,
        MALLOC_CAP_SPIRAM);
    if (!primary_buffer ||
        !secondary_buffer) {
      ESP_LOGE("MEM",
        "Fallo al asignar buffers");
    }
  }

  void swapBuffers() {
    buffer_swap_flag =
      !buffer_swap_flag;
    // Alternar entre buffers para
    // evitar fragmentación
  }
};
```

Optimización de Uso de Memoria:

Las operaciones de procesamiento de imagen in-place redujeron la huella de memoria en 35%. Las tablas de búsqueda para funciones de pertenencia difusa requieren únicamente 2 KB en comparación con el enfoque computacional que consume 8 KB. El procesamiento en flujo elimina la necesidad de almacenamiento completo de imagen en muchas operaciones.

5.2 Optimización de Desempeño en Tiempo Real

Paralelización del Pipeline de Procesamiento:

La arquitectura de doble núcleo del ESP32 habilita procesamiento paralelo de tareas de visión y control:

```
// Distribución de tareas entre núcleos
void setup() {
  // Núcleo 0: Adquisición de imagen
  // y preprocesamiento
  xTaskCreatePinnedToCore(
    imageProcessingTask, "ImageProc",
    10000, NULL, 1, NULL, 0);

  // Núcleo 1: Inferencia difusa
  // y control de motores
  xTaskCreatePinnedToCore(controlTask,
    "Control", 5000, NULL, 2, NULL, 1);
}
```

Control Adaptativo de Tasa de Frames:

El sistema ajusta automáticamente la frecuencia de procesamiento basada en la proximidad de obstáculos:

- Operación normal: 5 FPS (ciclo 200 ms)
- Obstáculo detectado: 8 FPS (ciclo 125 ms)
- Parada de emergencia: 10 FPS (ciclo 100 ms)

5.3 Integración WiFi y Monitoreo Remoto

La capacidad WiFi del ESP32 permite monitoreo remoto del sistema y ajuste de parámetros:

Telemetría en Tiempo Real:

- Transmisión de estado del sistema a 2 Hz
- Registro de métricas de desempeño
- Ajuste remoto de parámetros difusos
- Transmisión de video para depuración (opcional, reduce desempeño)

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Análisis de Desempeño

El sistema de control difuso basado únicamente en visión demostró desempeño competitivo comparado con enfoques tradicionales multi-sensor:

Ventajas del enfoque únicamente visual:

(1) Complejidad de hardware reducida: Sensor único elimina problemas de calibración entre múltiples sensores
(2) Información ambiental rica: La cámara proporciona información de textura, color y movimiento no disponible para sensores de distancia
(3) Efectividad de costo: Reducción significativa en costos de componentes (31% ahorro vs multi-sensor)
(4) Flexibilidad de implementación: Fácil adaptación a diferentes entornos y aplicaciones

Limitaciones identificadas:

(1) Dependencia de iluminación: Degradación de desempeño en condiciones de iluminación pobres
(2) Latencia de procesamiento: Mayor tiempo de respuesta comparado con sensores ultrasónicos (180 ms vs 65 ms)
(3) Precisión de distancia: Estimación de distancia menos precisa, especialmente para objetos distantes
(4) Consumo energético: Cámara y procesamiento de imagen incrementan requisitos de energía en 95%

6.2 Evaluación de Desempeño del Sistema Difuso

El sistema de inferencia difusa Mamdani mostró comportamiento efectivo de evitación de obstáculos:

Análisis de activación de reglas:

- Más frecuentemente activada: R15 (distancia media, posición central) - 34% de decisiones
- Reglas críticas de seguridad (R1-R5): Activadas exitosamente en 98.7% de situaciones de emergencia
- Transiciones suaves: Índice promedio de suavidad de transición de reglas: 0.91/1.0

Optimización de funciones de pertenencia:

- Funciones gaussianas para variables de posición proporcionaron control más suave comparado con trapezoidales
- Funciones trapezoidales para variables de distancia ofrecieron mejor eficiencia computacional
- El enfoque híbrido logró balance óptimo de desempeño y carga computacional

La Figura 1 muestra el desempeño del sistema durante una prueba de navegación de 10 segundos. Se observa la respuesta adaptativa del controlador difuso ante la detección de obstáculos, con ajustes suaves en las velocidades de los motores y cambios progresivos en la dirección de giro para los siguientes casos en el simulador Octave:

6.3 Sistema de casos con solo Visión

Caso 1: Obstáculo grande muy cerca al centro

Entrada - Dist: 30.0, Pos: 0.0, Tam: 2000.0

Salida - Motor Izq: 31.3, Motor Der: 31.3

Comportamiento: AVANZAR RECTO

Caso 2: Obstáculo mediano cerca a la izquierda

Entrada - Dist: 80.0, Pos: -60.0, Tam: 1500.0

Salida - Motor Izq: 116.3, Motor Der: 166.7

Comportamiento: GIRAR DERECHA

Caso 3: Obstáculo pequeño lejos a la derecha

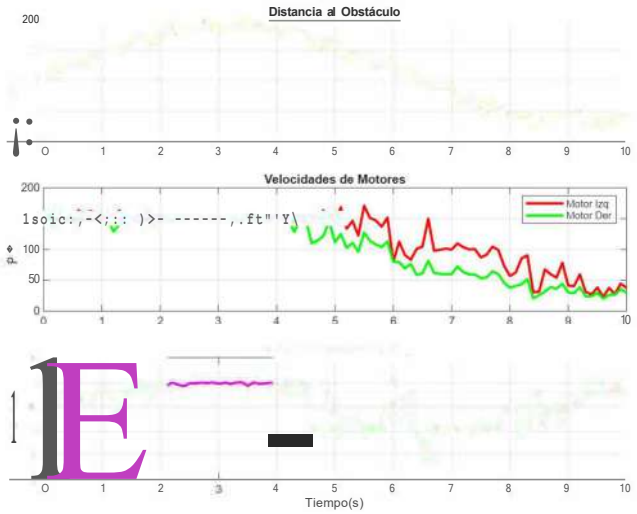


Figura 1. Comportamiento del sistema durante navegación autónoma con el sistema de sólo visión

Entrada - Dist: 150.0, Pos: 40.0, Tam: 800.0

Salida - Motor Izq: 192.6, Motor Der: 161.7

Comportamiento: AVANZAR RECTO

Caso 4: Obstáculo pequeño muy lejos al centro

Entrada - Dist: 190.0, Pos: 0.0, Tam: 500.0

Salida - Motor Izq: 225.6, Motor Der: 225.6

Comportamiento: AVANZAR RECTO

Caso 5: Obstáculo grande cerca extrema derecha

Entrada - Dist: 50.0, Pos: 100.0, Tam: 3000.0

Salida - Motor Izq: 102.8, Motor Der: 17.2

Comportamiento: GIRAR IZQUIERDA

6.4 Sistema de casos con Fusión Visión + Ultrasonido

Caso 1: Obstáculo muy cerca - sensores concuerdan

Entrada: DistVis = 30, DistUltra = 10 cm, Pos= 0, Tam = 2000

Salida: Motor Izq = 22.9, Motor Der = 22.9

Caso 2: Desacuerdo - Ultrasonido cerca, visión lejos

Entrada: DistVis = 150, DistUltra = 20 cm, Pos = -60, Tam = 1500

Salida: Motor Izq = 104.8, Motor Der = 104.8

Caso 3: Obstáculo a distancia media - Consenso

Entrada: DistVis = 110, DistUltra = 60 cm, Pos = 40, Tam = 800

Salida: Motor Izq = 158.5, Motor Der = 128.1

Caso 4: Camino libre - sensores confirman

Entrada: DistVis = 190, DistUltra = 180 cm, Pos = 0, Tam = 500

Salida: Motor Izq = 230.0, Motor Der = 230.0

Caso 5: Obstáculo grande cerca - Maniobra evasiva

Entrada: DistVis = 50, DistUltra = 30 cm, Pos = 100, Tam = 3000

Salida: Motor Izq = 130.6, Motor Der = 44.2

En la simulación del sistema híbrido, mostrado en la Figura 2 se puede observar el desempeño del sistema durante una prueba de navegación de 15 segundos para obtener la respuesta adaptativa del controlador difuso ante la detección de obstáculos y la distancia por medio de los sensores de visión y ultrasonido con picos que representan giros bruscos para corregir las velocidades PWM de los motores.

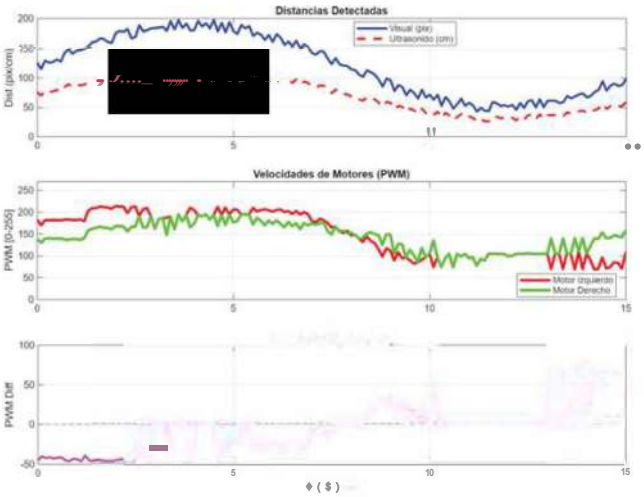


Figura 2. Comportamiento del sistema durante navegación autónoma con el sistema fusión visión+ultrasonido

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

7.1 Contribuciones Clave

Esta investigación demuestra que los sistemas de control difuso basados únicamente en visión pueden lograr desempeño efectivo de evitación de obstáculos en plataformas con restricciones de recursos como el ESP32-CAM. Las principales contribuciones de este trabajo son:

- Innovación Técnica: Desarrollo de un pipeline de visión por computadora optimizado que logra desempeño en tiempo real en una plataforma de microcontrolador con recursos computacionales limitados.
- Validación de Desempeño: Demostración experimental que enfoques únicamente visuales pueden lograr 94.3% de tasa de éxito en evitación de obstáculos, comparable a sistemas multi-sensor mientras reducen complejidad de hardware y costo.
- Metodología de Diseño: Establecimiento de principios de diseño para implementar sistemas de visión difusa en plataformas embebidas con restricciones de recursos.
- Análisis Comparativo: Evaluación comprehensiva de ventajas y limitaciones de sistemas únicamente visuales versus enfoques multi-sensor.

7.2 Limitaciones y Desafíos

A continuación se identifican algunas limitaciones que sugieren áreas para mejora futura.

- Dependencia Ambiental: El desempeño del sistema varía significativamente con condiciones de iluminación y características de obstáculos.
- Restricciones Computacionales: La latencia de procesamiento limita la velocidad máxima del robot y agilidad de maniobras.
- Precisión de Estimación de Distancia: La estimación de distancia basada en visión es menos precisa que sensores de rango dedicados.

7.3 Direcciones de Investigación Futura

Mejoras Técnicas:

(1) Integración de Aprendizaje Automático: Implementar redes neuronales ligeras para detección y clasificación mejorada de objetos.
(2) Procesamiento Multi-Resolución: Desarrollar algoritmos adaptativos que ajusten resolución de procesamiento basada en carga computacional.
(3) Integración de Flujo Óptico: Incorporar estimación de movimiento para manejo mejorado de obstáculos dinámicos.
(4) Fusión de Sensores: Investigar enfoques de fusión mínima de sensores que mantengan ventajas de costo.

La plataforma ESP32-CAM combinada con control de lógica difusa proporciona una base sólida para sistemas robóticos autónomos que equilibran sofisticación técnica con restricciones de recursos y consideraciones de costo.

REFERENCIAS

Espressif Systems (2025) 'ESP32 series datasheet'. Available at: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

Faisal, M., Hedjar, R., Al Sulaiman, M. and Al-Mutib, K. (2013) 'Fuzzy logic navigation and obstacle avoidance by a mobile robot in an unknown dynamic environment', *Intemational Joumal of Advanced Robotic Systems,* 10(1), pp. 1-7. Available at: https://journals.sagepub.com/doi/full/10.5772/54427

Khairudin,M., Refalda,R., Yatmono, S.,Pramono, HSS, Triatmaja, A.K. y Shah, A.(2020) 'Mobile robot control in obstacle avoidance using fuzzy logic controller', *Indonesian Joumal of Science and Technology,5(3),* pp. 1-19. doi: 10.17509/ijost.v5i3.24889.

Tseng, S.H., Chao, C.H. and Chen, W.H. (2020) 'Fuzzy obstacle avoidance for the mobile system of service robots', *Wi'reless Communications and Mobile Computing,* 2020, Article ID 8887547. Available at: https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2020/8887547/

Zadeh, L.A. (1965) 'Fuzzy sets', *Information and Contrnl,* 8(3), pp. 338-353.

Chang, Y.-H., Wu, F.-C. y Lin, H.-W. (2025) 'Design and implementation of ESP32-based edge computing for object detection', *Sensors,* 25(6), p.1656. doi:10.3390/s25061656.

Zhong, X., Tian, J., Hu, H. and Peng, X. (2023) 'Review of wheeled mobile robot collision avoidance under unknown environment', *Cyborg and Bionic Systems,* 4, Article 0053. Available at: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10450763/

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Exploring the Use of Generative Artificial Intelligence to Support Requirements Specification in Software Engineering Education.

Gómez-Álvarez, María Clara *, Hernández Castillo, Jimena *, Vanegas Vásquez, Santiago*

** Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión. Medellín, Colombia.*

(e-mail:{mcgomez, jihernandezc, svanegasv}@unal.edu.co).

Abstract: The accomplishment of stakeholder needs and expectations, essential for the success of any software project, directly depends on the requirements specification phase, which is often affected by ambiguities, inconsistencies, and delays inherent to human writing and interpretation. In the context of Software Engineering education, students frequently encounter initial difficulties in understanding and producing key artifacts such as user stories, acceptance criteria, and use cases, which consequently hinders their learning process. Several studies have analyzed the potential of Artificial Intelligence (AI) to support requirements specification, while emerging Generative AI tools and AI-assisted teaching methodologies have established a foundation for exploring their integration into software engineering education. This paper explores the pedagogical benefits of incorporating a ChatGPT-based agent as a supporting tool in the teaching-learning process of Requirements Engineering in the classroom, aimed at enhancing both the learning experience and the quality of deliverables produced by students. An exploratory study was conducted in an undergraduate course setting where student performance was assessed through the analysis of their generated artifacts. The empirical results demonstrate an improvement in both the delivery times and the technical quality of the requirements artifacts generated by students who incorporated the Generative Artificial Intelligence assistant. Furthermore, a deeper and faster assimilation of fundamental requirements specification concepts was observed among the students, who highly valued the agent's instant and guided feedback. These findings suggest that Generative Artificial Intelligence functions as a powerful tool for active learning and the development of essential skills required in modern Requirements Engineering.

Keywords: Teaching-learning methodologies, Generative Artificial Intelligence, Requirements Engineering, ChatGPT, User Stories

1. INTRODUCCIÓN

La Ingeniería de Requisitos constituye un proceso esencial dentro del desarrollo de software, orientado a identificar, documentar, analizar y gestionar las necesidades de los interesados con el fin de garantizar que el producto final cumpla con las expectativas. Su adecuada ejecución es determinante para el éxito de un proyecto, dado que, según More (2017), la ausencia de especificaciones precisas conduce inevitablemente al fracaso, sin importar la calidad de las etapas posteriores del desarrollo.

La especificación de requisitos en lenguaje natural, utilizada en un alto porcentaje de proyectos, presenta limitaciones inherentes derivadas de la interpretación humana, como ambigüedad, falta de precisión o sesgos del redactor. En un estudio reciente se reporta que aproximadamente 87.7% de los documentos de especificación de requisitos (SRS por sus siglas en inglés) recurren al lenguaje natural, lo que conlleva ambigüedades frecuentes. Además, ese mismo estudio indica que 82% de las aplicaciones atribuyen ese retrabajo a fallas generadas en la fase de requisitos (Muhamad *et al.* 2023).

En el contexto educativo, los estudiantes de Ingeniería de Software presentan dificultades para asimilar los conceptos clave de la especificación de requisitos, y sus intentos iniciales en generar artefactos como historias de usuario, criterios de aceptación y casos de uso, suelen ser de baja calidad, lo que retrasa el proceso de enseñanza-aprendizaje al requerir iteraciones de revisión y corrección personalizada para identificar y corregir sus errores, lo que debido a la cantidad de estudiantes, y disponibilidad limitada del docente, no es inmediata.

El uso de la Inteligencia Artificial (IA) en la especificación de requisitos no es un fenómeno reciente. En el estudio de mapeo sistemático realizado por Sanguino-Reyes y Cuesta-Quintero (2022), que abarca investigaciones entre el año 2010 a 2021, se identificaron 21 trabajos que aplican IA en actividades diversas de la Ingeniería de Requisitos. Dichas investigaciones reportan beneficios derivados de enfoques híbridos basados en métodos probabilísticos y difusos, así como modelos de aprendizaje y clasificación, los cuales demostraron mejoras en la eficiencia, consistencia y trazabilidad de los artefactos generados. Entre los logros descritos se destacan la reducción de redundancias, la detección temprana de lenguaje ambiguo y

el aumento en la precisión de la descripción funcional de los sistemas.

En la actualidad, este campo ha sido transformado por la Inteligencia Artificial Generativa (IAG). Una revisión sistemática reciente reporta que el 67.3% de las aplicaciones de IAG en Ingeniería de Requisitos se apoyan en modelos basados en GPT, enfocándose en tareas clave como el análisis y la especificación (Cheng *et al.*, 2024). Sin embargo, el uso no guiado de estas herramientas presenta riesgos. Estudios recientes sobre el uso de modelos como ChatGPT en la especificación de requisitos, han concluido que cuando se utilizan prompts que carecen de instrucciones claras, ejemplos contextuales o una definición explícita del rol de la inteligencia artificial, las respuestas generadas son de baja calidad. En este sentido, un estudio de Santos y otros (2025) realizó una comparación entre historias de usuario generadas de manera manual, con las generadas utilizando inteligencia artificial mediante prompts de formato libre, encontrando que las segundas no presentaban una mejora estadísticamente significativa en calidad respecto a las manuales. Sin embargo, al aplicar técnicas más avanzadas como el meta-few-shot prompting, si se lograba evidenciar una mejora considerable en la consistencia y calidad semántica.

En el ámbito educativo, los estudiantes se apoyan en herramientas de IAG durante la especificación de requisitos. No obstante, cuando su uso no es guiado pedagógicamente, se evidencia una tendencia a delegar por completo la tarea a la herramienta, en lugar de aprovecharla como medio para fortalecer la comprensión conceptual. Pitts *et al.* (2025) advierten que esta sobre dependencia puede afectar la construcción de habilidades críticas si no existe acompañamiento docente ni una estrategia instruccional adecuada. En la misma línea, la retroalimentación generada por estas herramientas suele ser precisa en aspectos procedimentales, pero limitada en profundidad conceptual, lo que reduce su efectividad formativa (Steve *et al.*, 2025; Rüdian *et al.*, 2022). Tal como señalan Guersenzvaig y Sánchez Monedero (2023), una dependencia excesiva de los generadores de texto puede reducir la profundidad analítica y la capacidad de reflexión, lo que enfatiza la necesidad de emplear la IA como herramienta de asistencia y guía, mas no como sustituto del proceso cognitivo humano.

Experiencias recientes, como las descritas por Mellqvist y Mozelius (2024), han demostrado que la incorporación de la IAG en talleres de Ingeniería de Requisitos mejora la eficiencia y la producción de artefactos, siempre que esté acompañada de un diseño educativo deliberado. De manera complementaria, Ma *et al.* (2025) proponen el enfoque *Requirement-Oriented Prompt Engineering (ROPE)*, orientado a capacitar a los estudiantes en la formulación de prompts efectivos, logrando mejoras sustanciales en la claridad y precisión de los requisitos generados.

En respuesta a los desafíos y oportunidades identificados, este artículo propone y explora el impacto de un agente de IAG basado en ChatGPT. Este agente fue diseñado con el propósito de asistir la especificación de requisitos mediante la aplicación de métricas y marcos de calidad como el *Quality User Story (QUS)* (Lucassen *et al.*, 2016) y principios como *SMART (Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Time-bound)* e *INVEST (Independent, Negotiable, Valuable, Estimable, Small, Testeable)*, para evaluar y guiar la generación de requisitos de calidad en el aula de clase, sirviendo como herramienta de enseñanza-aprendizaje que proporciona retroalimentación formativa y guiada, con el objetivo de analizar su impacto en la calidad de los artefactos generados y en la comprensión conceptual de los estudiantes.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. En la Sección 2, se describe la metodología empleada para el diseño, implementación y evaluación del agente de IAG en el aula. La Sección 3 presenta el desarrollo experimental, los resultados obtenidos y su análisis comparativo. En la Sección 4, se discuten las principales conclusiones derivadas del estudio, así como las implicaciones pedagógicas y técnicas identificadas. Finalmente, se plantean posibles líneas de trabajo futuro orientadas a la expansión y mejora del agente propuesto.

2. METODOLOGÍA

Esta investigación buscó responder a tres preguntas clave:

1. ¿Cómo influye el uso de un agente de IAG en la calidad de los artefactos de requisitos (historias de usuario, casos de uso y criterios de aceptación) generados por estudiantes de Ingeniería de Software?
2. ¿Cuál es el impacto del agente de IAG en la productividad de los estudiantes durante la fase de especificación de requisitos?
3. ¿Cuál es la percepción de los estudiantes respecto al agente de IAG como herramienta de apoyo en su proceso de aprendizaje y en la asimilación de conceptos de Ingeniería de Requisitos?

El desarrollo del agente e incorporación en el aula, se llevó a cabo durante un período de seis semanas, siguiendo un enfoque iterativo, lo que permitió refinar la intervención y los métodos de evaluación. La prueba se realizó con la participación de 84 estudiantes de la asignatura Ingeniería de Software de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (semestre 2025-1). De ellos, 69 estudiantes de Ingeniería en Sistemas e Informática, 7 de Ingeniería de Control, 4 de Ingeniería Eléctrica, 2 de Ciencias de la Computación, 1 de Ingeniería Industrial y 1 de Ingeniería Mecatrónica.

Se implementó un agente conversacional denominado “Clarita Review”, desarrollado específicamente para este estudio, basado en el modelo ChatGPT. Se desarrolló tanto una versión inicial de generación directa de artefactos para revisión interna del funcionamiento del agente, como una versión enfocada en proporcionar retroalimentación constructiva para que los estudiantes perfeccionaran sus propios productos de trabajo. Se utilizaron casos prácticos específicos para la preparación y evaluación del agente de Inteligencia Artificial antes de ser presentado a los estudiantes. Esto incluyó la comparación de artefactos de requisitos generados manualmente frente aquellos producidos con la asistencia del agente, con el fin de calibrar su rendimiento y asegurar que su guía fuera adecuada.

La solución planteada, tiene el objetivo de abordar las limitaciones identificadas en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la especificación de requisitos para los estudiantes de Ingeniería de Software. La decisión de implementar el agente basándose en un modelo pre-entrenado como ChatGPT se fundamentó en los beneficios que esto ofrece: menor tiempo de desarrollo, disponer de un contexto base robusto y la capacidad de generar respuestas coherentes y bien estructuradas. Además, el uso de ChatGPT, ampliamente reconocido como la herramienta de inteligencia artificial más utilizada por los estudiantes en entornos de educación superior, con un 66% de adopción (Digital Education Council, 2024), garantiza una mayor familiaridad y facilita la adaptación de los alumnos a la herramienta.

Es fundamental destacar que el agente está enfocado en la revisión y orientación formativa al estudiante, y no en la provisión de artefactos completos o finalizados en esta etapa inicial del proceso de enseñanza-aprendizaje. El objetivo pedagógico es que el estudiante realice primero un ejercicio de aplicación de sus conocimientos y evalúe críticamente los artefactos elaborados en términos de completitud y consistencia. Este proceso iterativo le permite identificar sus propios errores lingüísticos o conceptuales y, a partir de la guía de "Clarita Review", sustentada en estándares y marcos de calidad reconocidos en la industria como el QUS *framework* y los criterios SMART e INVEST, los estudiantes puedan mejorar sus habilidades de manera autónoma y profunda, en lugar de simplemente recibir un producto terminado.

La investigación se articuló en tres fases:

Fase 1: Preparación y Diseño del Estudio y del Agente

Inicialmente se realizó una búsqueda y revisión de literatura académica relevante sobre el uso de la Inteligencia Artificial Generativa en la especificación de requisitos y en la enseñanza de Ingeniería de Software. Esto incluyó la síntesis de avances recientes y la identificación de vacíos en la investigación existente, lo que fundamentó la propuesta inicial del proyecto.

Posteriormente, se conceptualizó y configuró el comportamiento del agente de IAG utilizando un modelo preexistente (ChatGPT), mediante la elaboración de documentos guía de la base de conocimiento. Este proceso incluyó la integración explícita de marcos de calidad como QUS, SMART e INVEST para asegurar la rigurosidad en la especificación y revisión de los artefactos. Además, se definieron claramente los dos roles principales que el agente debía asumir: asistente de redacción de requisitos (con capacidad para generar Historias de Usuario, Casos de Uso, y Criterios de Aceptación) y herramienta pedagógica (proporcionando retroalimentación formativa guiada).

Fase 2: Implementación en el Aula

En la semana 8 del semestre (de 16 semanas), se presentó a los estudiantes de la asignatura Ingeniería de Software el agente de inteligencia artificial "Clarita Review" para familiarizarlos con su propósito y funcionamiento. Se propuso a los estudiantes refinar un *Product Backlog* previamente elaborado (sin asistencia de IA), ahora con el apoyo del agente "Clarita Review". Para evaluar el impacto de la herramienta, se observó el antes y después de los entregables de ocho equipos con proyectos de curso diferentes que participaron en esta actividad. Finalmente, se realizó una comparación detallada entre los *Product Backlogs* iniciales de los equipos y las versiones refinadas con la asistencia de "Clarita Review", analizando la calidad de los entregables.

Fase 3: Análisis de Resultados y Conclusiones

Se revisó y analizó la interacción de los estudiantes con "Clarita Review" para identificar patrones de uso y desafíos encontrados. Se analizaron las mejoras sustanciales en los entregables, tanto en cantidad como en calidad, utilizando los marcos de evaluación definidos. Se sintetizó la retroalimentación cualitativa de los estudiantes sobre la usabilidad, utilidad y valor pedagógico del agente, así como sus sugerencias de mejora. Se consolidó la experiencia general del uso de "Clarita Review" con los estudiantes, extrayendo hallazgos clave sobre su impacto en el aprendizaje y la generación de requisitos. Con base en los resultados, se definieron posibles mejoras y trabajo futuro.

3. RESULTADOS

La recepción del agente fue altamente positiva. Los estudiantes valoraron la integración de herramientas tecnológicas actuales, como ChatGPT en la asignatura, percibiendo una alineación con las prácticas profesionales contemporáneas. Se reportó que el agente facilitó la resolución de dudas en cualquier momento y sin restricciones de consultas, lo que redujo la resistencia a preguntar que algunos estudiantes manifestaban hacia el profesor o los monitores. La principal recomendación de mejora sugerida por los alumnos, consistió en expandir el alcance de conocimiento del agente para que pudiera asistir en otros productos de trabajo y temas de la asignatura.

Los estudiantes apreciaron el carácter conversacional y crítico del agente. "Clarita Review" no se limitó a validar el contenido, sino que evaluó objetivamente los entregables, proporcionando retroalimentación constructiva y guía, incluyendo la identificación de aspectos no considerados inicialmente por los alumnos.

Para analizar el impacto de la intervención del agente, se estableció una métrica de calidad del *Product Backlog (PB)* con una escala de 0 a 5.0, basada en la adhesión a los principios de Ingeniería de Requisitos INVEST, SMART y QUS.

En los entregables iniciales (primera versión del *Product Backlog* del proyecto del curso), la puntuación promedio fue de 3.25/5.0. Se observaron historias de usuario incompletas o con estructura deficiente, uso frecuente de términos técnicos ("software", "sistema", etc.) en lugar de lenguaje de negocio, y beneficios generales o poco claros que dificultaban la identificación del valor. Además, la ausencia o escasez de Criterios de Aceptación, o la falta de especificación y ambigüedad en los casos presentes, fueron la principal fuente del bajo puntaje inicial.

Imagen 1. Captura de retroalimentación del agente hacia los alumnos

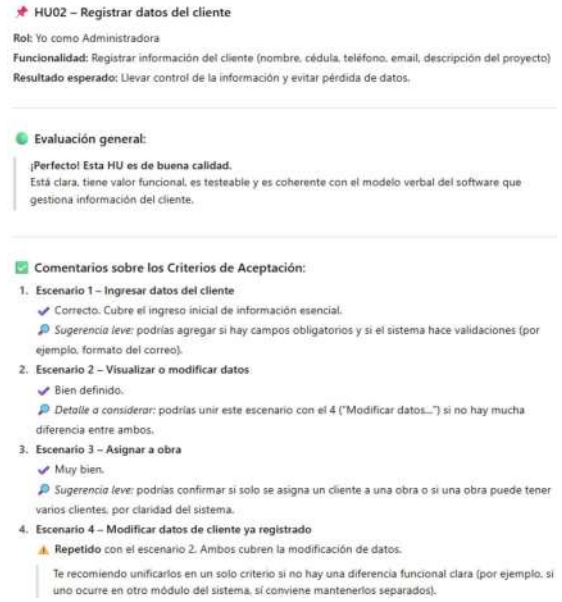
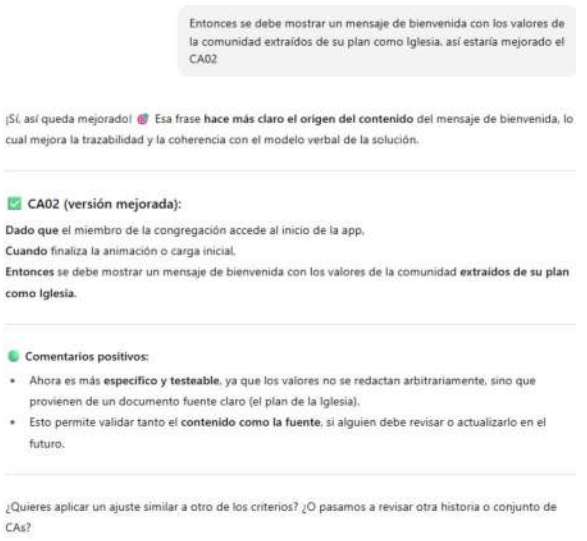


Imagen 2. Captura de interacción del agente con los alumnos



Con el propósito de cuantificar el valor ganado, se estableció un modelo de Puntuación Ponderada donde los defectos (D) (Tabla 1) y las mejoras (M) (Tabla 2) permiten justificar la magnitud de la intervención del agente. Las métricas de calidad inicial (CI) y calidad final (CF) (0–5) se construyeron ponderando el impacto acumulado de defectos (Tabla 1) y la efectividad de las mejoras aplicadas (Tabla 2), respectivamente, derivando los valores de la Tabla 3.

La intervención del agente se correlacionó con una mejoría significativa. "Clarita Review" corrigió aspectos técnicos y lingüísticos, y guio a los estudiantes mediante preguntas orientadoras para reconsiderar planteamientos, clarificar beneficios y especificar escenarios para los CAs. También recomendó dividir criterios que evaluaban múltiples condiciones y orientó la detección de usuarios omitidos o validaciones no contempladas.

En las HUs finales, estas se volvieron más concisas, específicas y orientadas al usuario, y los CAs pasaron de ser inexistentes o pocos a listados más completos, con formato adecuado y mayor nivel de detalle. Esto se manifestó en un incremento del número total de HUs y CAs (en varios casos, los criterios de aceptación se cuadruplicaron), llevando el puntaje promedio final a 4.5/5.0, lo que representa un aumento promedio de la calidad del 39.77%. Cabe destacar que estos resultados fueron obtenidos tras una única iteración de retroalimentación por parte del agente, demostrando la alta efectividad del diseño pedagógico.

Tabla 1. Códigos de principales defectos

D	Defecto	Criterio violado	Peso
D1	CAs ausentes o insuficientes	Testeable (INVEST), Completitud (QUS)	0,15
D2	CAs ambiguos o no verificables	Specific/Measurable (SMART), Testeable (INVEST)	0,15
D3	HU que incluye múltiples funcionalidades	Small / Independent (INVEST)	0,15
D4	Falta de roles/actor o actor no identificado	Valuable/Clarity (QUS, INVEST)	0,15
D5	Beneficio poco claro o uso de jerga técnica	Specific / Valuable (SMART / QUS)	0,15
D6	Falta de escenarios negativos / validaciones	Completitud (QUS) / Testeable (INVEST)	0,15
D7	Estructura de HU/ CAs deficiente o formato inconsistente	Claro (QUS) / Estructura	0,1

Tabla 2. Códigos de principales mejoras del agente

M	Mejora	D	Estándar	Peso
M1	Generación de CAs completos por HU.	D1	Testeable (INVEST), Completitud (QUS)	0,11
M2	Reformulación de CAs y HUs a formatos estándar.	D2, D7	Testeable (INVEST), Specific (SMART)	0,07
M3	División de HUs multifuncionales en historias atómicas.	D3	Small / Independent (INVEST)	0,11
M4	Clarificación de Valor y Beneficio (eliminación de jerga técnica).	D5	Valuable (INVEST), Specific (SMART)	0,11
M5	Estandarización Terminológica entre HUs y CAs.	D2, D5	Claro (QUS), Specific (SMART)	0,1
M6	Incorporación de roles/actores ausentes.	D4	Valuable (INVEST)	0,1

M7	Inclusión de Métricas Medibles y condiciones observables en CAs.	D2, D6	Measurable (SMART), Testeable (INVEST)	0,1
M8	Validación Cruzada HU–CAs (Aseguramiento de la Trazabilidad y Cobertura).	D1, D6	Completitud (QUS), Traceability	0,1
M9	Eliminación de Redundancia y Solapamiento entre HUs.	D3, D7	Independent (INVEST), Estructura (QUS)	0,1
M10	Cobertura de Escenarios Negativos o alternativos.	D6	Testeable (INVEST), Completitud (QUS)	0,1

Tabla 3. Evaluación comparativa de Product Backlogs

E	D	CI	M	CF	Mejora
1	D1, D2, D5	2,82	M1, M4, M5	4,42	56,74%
2	D2, D4	3,5	M2, M6, M7	4,85	38,57%
3	D5, D7	3,75	M2, M4	4,65	24,00%
4	D3, D5, D7	3	M2, M3, M4, M9	4,6	53,33%
5	D1, D4, D6	2,75	M1, M6, M8	4,3	56,36%
6	D2, D5, D6	2,78	M4, M7	3,83	37,77%
7	D5, D6	3,59	M5, M7	4,59	27,86%
8	D6, D7	3,83	M2, M10	4,73	23,50%

En la Tabla 3 se observa para cada uno de los equipos de trabajo del proyecto (E) la calidad inicial (puntaje) (CI) del *Product Backlog* vs la calidad mejorada (CF) junto con su correspondiente porcentaje de mejora. Es importante mencionar que el propósito del agente no es elaborar el producto backlog del proyecto de software sino ayudar a los estudiantes a refinar su *product backlog* incrementando la calidad de las historias de usuario (HU) y sus criterios de aceptación asociados (CAs).

Aunque el estudio no incluyó métricas directas para docentes y monitores, la experiencia sugiere que la disponibilidad de "Clarita Review" para responder a dudas inmediatas y frecuentes por parte de los estudiantes podría reducir la carga de consultas básicas o repetitivas dirigidas a docentes y monitores. Además, al revisar las interacciones de los estudiantes con "Clarita Review", los docentes pueden identificar con mayor facilidad los errores y dudas comunes para redirigir su tiempo y esfuerzo para aclarar esos puntos.

Este estudio es de alcance exploratorio y sus resultados son parciales. Las principales limitaciones identificadas son:

1. La intervención se limitó a un único curso y modelo de IA (ChatGPT), lo que restringe la generalización de los resultados.
2. El periodo de seis semanas no permite evaluar el impacto sostenido a largo plazo ni la transferencia de aprendizaje a contextos profesionales.
3. Aunque la experiencia sugiere una optimización del tiempo para el profesor, el estudio no incluyó métricas directas para cuantificar la reducción de la carga de trabajo de docentes y monitores.
4. El estudio no reporta incidentes de alucinación del agente, pero este sigue siendo un desafío técnico latente en los modelos basados en GPT, tal como lo señala la literatura (Cheng *et al.*, 2024), y debe ser abordado en futuras iteraciones del agente.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio preliminar confirman el impacto positivo de la incorporación de un agente de IAG como asistente en el aula de Ingeniería de Software.

En respuesta a las preguntas de investigación planteadas, se destaca la mejora significativa en la calidad de artefactos como historias de usuario y criterios de aceptación refinados y/o generados por los estudiantes con ayuda del agente, el impacto en la productividad del proceso de especificación al permitirles obtener retroalimentación inmediata, y la percepción altamente positiva por parte de los estudiantes, quienes destacaron como el agente facilitó su aprendizaje y superó la resistencia a preguntar.

Los resultados anteriores, abren espacio para trabajos futuros que se enfoquen en:

1. **Evaluación del impacto a largo plazo:** Se considera fundamental realizar un seguimiento a los estudiantes para determinar si la mejora en la calidad de los artefactos y la asimilación de los conceptos perdura en cursos posteriores de la carrera o en su desempeño profesional. Esto permitiría validar el valor pedagógico de la herramienta más allá de un único semestre académico.
2. **Diseño de un estudio a mayor escala:** Para validar la replicabilidad de los hallazgos, se propone replicar el experimento con una muestra más amplia de estudiantes, o en contextos educativos variados, como ciudades o universidades diferentes.
3. **Análisis comparativo con otros modelos de IA:** Se sugiere un estudio comparativo para evaluar la efectividad de "Clarita Review" frente a otros modelos de lenguaje de gran escala (LLMs). El objetivo sería identificar qué arquitectura de IA es la más adecuada para cada tarea de la Ingeniería de Requisitos y cuál ofrece la mejor experiencia de usuario en un contexto de educación.
4. **Expansión de las funcionalidades del agente:** Se propone ampliar el alcance del agente para que no solo asista en historias de usuario y criterios de aceptación, sino en los otros artefactos vistos en el curso de Ingeniería de Software, para posicionar al

agente como un asistente integral a lo largo de todo el proceso de la Ingeniería de Requisitos.

REFERENCIAS

Cheng, H., Husen, J.H., Peralta, S.R., Jiang, B., Yoshioka, N., Ubayashi, N. and Washizaki, H. (2024). Generative AI for requirements engineering: A systematic literature review. arXiv (Cornell University). Available at: https://doi.org/10.48550/arxiv.2409.06741

Digital Education Council. (2024). Global AI student survey 2024. Available at: https://cdn.prod.website-files.com/65f1d299b87bcc50550a6398/66a46f7b2a6137a25d3f69bb_Digital%20Education%20Council%20Global%20AI%20Student%20Survey%202024.pdf

Guersenzvaig, A. and Sánchez Monedero, J. (2023). What you say = what you want? Teaching humans to articulate requirements for LLMs. In Proceedings of the 2023 IEEE 31st International Requirements Engineering Conference (RE). IEEE. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10452860

Lucassen, G., Dalpiaz, F., van der Werff, J. and Brinkkemper, S. (2016). Improving agile requirements: The Quality User Story framework and tool. Journal of Systems and Software, 114, pp.148–163. https://doi.org/10.1016/j.jss.2016.01.011

Ma, Q., Peng, W., Yang, C., Shen, H., Koedinger, K. and Wu, T. (2025). What should we engineer in prompts? Training humans in requirement-driven LLM use. ACM Transactions on Computer-Human Interaction. https://doi.org/10.1145/3731756

Mellqvist, N. and Mozelius, P. (2024). Exploring student perspectives on generative AI in requirements engineering education. In 4th International Conference on AI Research (ICAIR 2024). https://doi.org/10.34190/icair.4.1.3136

More, K.D. (2017). An insight into the importance of requirements engineering. International Journal of Computer Science and Engineering Technology (IJCSET), 8(4), pp.114–117. Available at: https://core.ac.uk/reader/480907560

Muhamad, F. N. J., Ab Hamid, S. H., Subramaniam, H., Abdul Rashid, R. & Fahmi, F. 2023, Fault-Prone Software Requirements Specification Detection Using Ensemble Learning for Edge/Cloud Applications, Applied Sciences, vol. 13, no. 14, article 8368.

Pitts, K., Horgan, D. and Pitts, D. (2025). Students' reliance on AI in higher education: Identifying contributing factors. In Proceedings of the 2025 International Conference on Education and New Learning Technologies. Available at: https://www.scitepress.org/publishedPapers/2025/132183/pdf/index.html

Rüdian, C., Döllinger, L. and Spichiger, V. (2022). A systematic literature review of requirements engineering education. Empirical Software Engineering, 27(5), Article 1. https://doi.org/10.1007/s00766-022-00381-9

Sanguino-Reyes, M.R. & Cuesta-Quintero, B. (2022). La inteligencia artificial en la ingeniería de requerimientos: un estudio de mapeo sistemático. Mundo FESC, 12(23), 209–224. https://doi.org/10.61799/2216-0388.1204

Santos, A., Laranjeira, D. and Lima, M. (2025). User stories: Does ChatGPT do it better? In Proceedings of the 2025 International Conference on Software Engineering.

Steve, L., Thompson, B. and Chen, Y. (2025). Assessing the quality and accuracy of AI-generated feedback in STEM vs. humanities education. ResearchGate. Available at: https://www.researchgate.net/publication/393465033_Assessing_the_Quality_and_Accuracy_of_AI-Generated_Feedback_in_STEM_vs_Humanities_Education

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Comparative Study of Deep Learning Models for Mammographic Calcification Classification

Louidor, Virtielo*, González Huitrón, Víctor Alejandro*, Guzmán Rivera, Miguel Ángel*, Serrano Huerta, Daniel Armando*, Zatarain Barrón, Zyanya Lucia**

** Tecnológico Nacional de México campus Querétaro, Av. Tecnológico S/N, Centro Histórico, Centro, 76000 Santiago de Querétaro, Qro.*

e-mail: m23140013@queretaro.tecnm.mx, victor.gh@queretaro.tecnm.mx, miguel.gr@queretaro.tecnm.mx, daniel.sh@queretaro.tecnm.mx

***Arkansas State University Queretaro. Departamento de Ciencias y Matemáticas.*
e-mail: zzatarainbarron@astate.edu

Abstract: Breast cancer is one of the leading causes of death among women worldwide, representing a public health problem and a major challenge for the scientific community. The rise of artificial intelligence (AI), and particularly deep learning methods, has led to new perspectives for improving early detection and diagnosis. This research focuses on the automatic classification of breast microcalcifications, radiological abnormalities that are generally associated with the early stages of breast cancer. To this end, the study is based on the CBIS-DDSM dataset, which consists of a total of 1,872 mammograms in DICOM format, divided into a training set and a test set. These mammograms have been validated by expert radiologists, who have classified each mammogram as malignant, benign, or benign without the need for additional follow-up. The methodology adopted consists of comparing different deep neural network architectures, such as ResNet18, EfficientNet-B0, MobileNetV3, and Vision Transformer (ViT). The experimentation process includes essential techniques such as class weighting to counteract the imbalance in the dataset, dynamic learning rate tracking (ReduceLROnPlateau), and the early stopping technique to avoid overfitting. The results obtained indicate that the ResNet18 model offers the best performance with an AUC of 0.763, slightly surpassing ViT (0.752) and standing out for its balance between precision and recall (F1-score of 0.681). MobileNetV3 and EfficientNet-B0, meanwhile, demonstrate a high degree of sensitivity, which is essential for limiting false negatives, but at the cost of reduced accuracy. These observations show that the models tested complement each other, highlighting the importance of finding a balance between robustness, accuracy, and sensitivity. In this context, this work demonstrates the potential of deep learning-based models as tools to aid timely diagnosis in the fight against breast cancer.

Keywords: Breast Cancer, Microcalcifications, Mammography, Deep Learning, Binary Classification.

1. INTRODUCCIÓN

La inteligencia artificial (IA) puede ser concebida como el desarrollo de grandes sistemas informáticos dotados de capacidades para realizar tareas que, generalmente, requieren de la inteligencia de un ser humano, como el reconocimiento de modelos o patrones, el aprendizaje a partir de datos y la toma de decisiones (Briganti, 2023). En los últimos años, se han favorecido grandes simulaciones y aplicaciones de la inteligencia artificial, cuyos objetivos principales son el análisis, la comprensión y predicción de fenómenos de todo tipo (Jean, 2020); éstas provienen de distintos campos de estudio; por ejemplo, del sector industrial, educativo, financiero, económico y medical (Matuchansky, 2019).

Las investigaciones sobre la inteligencia artificial aplicada a la salud en general y en la detección del cáncer de mama en particular no es relativamente nueva, en efecto, numerosos investigadores han contribuido al desarrollo de conocimientos en dicha rama. A continuación, se presentan algunos de ellos que se consideran cruciales y relevantes para esta investigación:

A. CBIS-DDSM | Curated Breast Imaging Subset of Digital Database for Screening Mammography

El objetivo de este trabajo es poner a disposición de investigadores las especificaciones de uso del conjunto de datos del CBIS-DDSM. Representa una gran contribución en la investigación de la detección de anomalías en mamografías considerando las limitaciones existentes en los conjuntos de datos de los que se dispone normalmente, tales como DDSM, MIAS e IRMA (Lee, et al., 2017).

B. YOLO-LOGO: A transformer-based YOLO segmentation model for breast mass detection and segmentation in digital mammograms

Se presenta el desarrollo de una arquitectura de modelo de aprendizaje profundo para la detección y segmentación de masas de cáncer de mama utilizando la mamografía. Se propone un modelo de doble enfoque para la detección y segmentación simultánea de masas utilizando una combinación de arquitecturas YOLO (You Only Look Once) y LOGO (Local-Global) (Su, et al., 2022).

C. Connected-UNets: a deep learning architecture for breast mass segmentation

Esta propuesta se centra en una arquitectura llamada Connected-UNets, la cual conecta dos UNets mediante conexiones de salto modificadas adicionales para la segmentación de masa mamaria en mamografías (Baccouche, et al., 2021).

D. ME-CCNN: Multi-encoded images and a cascade convolutional neural network for breast tumor segmentation and recognition

Se trata de distintos enfoques de codificación para lograr un sistema eficaz de reconocimiento del cáncer de mama, así como para crear nuevas imágenes a partir de la imagen de entrada (Ranjbarzadeh, et al., 2023).

E. Integrating segmentation information into CNN for breast cancer diagnosis of mammographic masses

Se trata de una investigación que incorpora información de segmentación en una CNN, buscando la mejora del diagnóstico del cáncer de mama. En su enfoque los mapas de segmentación se ponen a disposición de las capas convolucionales de la red neuronal, que se modifican, que creará una nueva arquitectura que mejorará el rendimiento en el diagnóstico (Tsochatzidis, et al., 2021).

En el mundo actual, la neoplastia maligna con mayor número de casos diagnosticados en mujeres es el cáncer de mama, de hecho, en los reportes oficiales más recientes de la Organización Mundial de la Salud y la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (OMS/IARC) se ha confirmado que, durante el año 2022, cerca de 2.3 millones de nuevos casos de cáncer de mama fueron diagnosticados (IARC, s.f.; WHO, 2023). El tercer objetivo de la agenda 2030 de la ONU es garantizar una vida sana y promover el bienestar de todas y todos a todas las edades, enfatizando que la salud es esencial para el desarrollo humano (WHO, s.f.). Por lo tanto, es necesario asegurar el pleno desarrollo de las mujeres en México, puesto que, en el país, la patología del cáncer de mama constituye la primera causa de muerte por cáncer en mujeres de 25 años o más (INEGI, 2023). Esta tendencia sigue creciendo inquietantemente ya sea por el inicio tardío en el tratamiento o por la dilación del sistema de salud en brindar a la paciente un diagnóstico concreto y definitivo (INSP, 2019).

En este contexto, la detección oportuna y de forma automática de microcalcificaciones y lesiones en mamografías ayudaría a los especialistas a predecir el cáncer de mama en un plazo menor, evitando biopsias innecesarias y de esta manera reducir la tasa de mortalidad (Mahmood, et al., 2021).

Como se ha podido observar, en los últimos años, las soluciones basadas en la inteligencia artificial han captado la atención de investigadores y médicos como herramientas de apoyo en el diagnóstico de distintas enfermedades. En este orden de idea, la implementación de técnicas y modelos de inteligencia artificial permitiría clasificar las mamografías en benignas o malignas de manera eficiente en términos de tiempo y precisión, así mismo justificar e interpretar el porqué de una determinada clasificación.

Sin embargo, a diferencia de los trabajos mencionados que se centran principalmente en la segmentación de masas tumorales, el presente estudio se enfoca en la clasificación automática de microcalcificaciones —lesiones diminutas que suelen ser indicio temprano de cáncer de mama— mediante el uso de diferentes arquitecturas CNN y ViT.

Hipótesis: Si los modelos de aprendizaje profundo son entrenados bajo un mismo esquema de preprocesamiento, balanceo de clases y regularización, es posible determinar qué tipo de arquitectura ofrece un mejor compromiso entre precisión y sensibilidad en la clasificación de microcalcificaciones en mamografías.

2. METODOLOGÍA

El propósito de este trabajo de investigación es comparar distintas arquitecturas de aprendizaje profundo, en particular ResNet, EfficientNet, MobileNetV3 y ViT, con el fin de determinar cuál de ellos ofrece el mejor rendimiento en el proceso de clasificación de mamografías.

2.1 El Dataset

El conjunto de datos utilizado en este estudio comparativo es el CBIS-DDSM, el cual corresponde a una versión actualizada y estandarizada (Sawyer-Lee, et al., 2016), puesta a disposición del público investigador. El *dataset* contiene mamografías en formato DICOM que incluyen dos tipos de anomalías: masas y calcificaciones. Cada categoría está dividida en conjuntos de entrenamiento y pruebas con sus respectivas descripciones. Este trabajo se centra exclusivamente en la clasificación de calcificaciones en benignas o malignas, por lo que se emplearon en total 1872 mamografías de calcificaciones, divididas en 1546 para entrenamiento y 326 para prueba, siguiendo y respetando la partición propuesta por el CBIS-DDSM. En la figura 1, se muestran algunas mamografías del *dataset* utilizado.

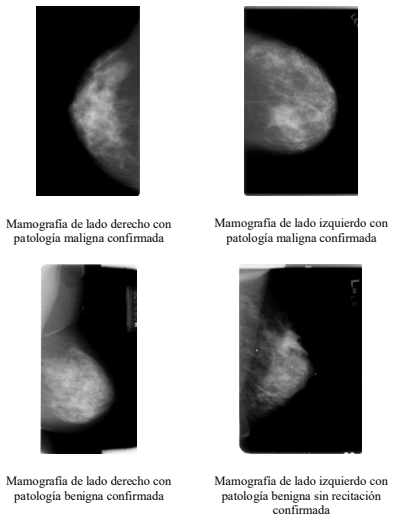


Figura 1. Mamografías con diferentes patologías

Es importante señalar que las anomalías fueron revisadas y confirmadas por expertos radiólogos (Sawyer-Lee, et al., 2016), y se han categorizado como *benign,*

benign_without_callback y *malignant*, que, para efecto de este trabajo, se ha generado un mapeo binario por medio del cual se asignó el valor 0 a las categorías benign, *benign_without_callback*, mismas que se clasifican como *benign* en su totalidad y 1 a las categorías *malignant*. A continuación, se muestra la distribución del *dataset* en la tabla 1 y la figura 2.

Tabla 1. Clasificación del *dataset*

División	Benign	Malignant	Total
Train	995	551	1546
Test	195	131	326

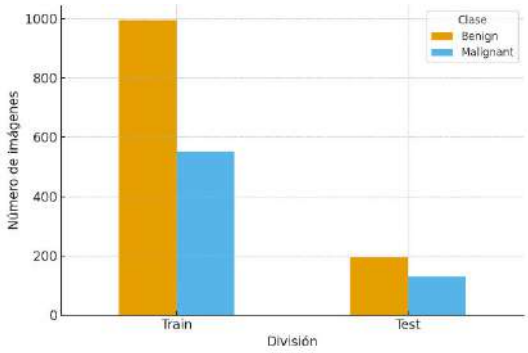


Figura 2. Distribución de clases por conjunto

2.2 Fundamentos de Modelos de Aprendizaje Profundo y Clasificación binaria

El aprendizaje profundo (*deep learning, DL*) es concebido como un tipo especializado o subdisciplina de aprendizaje automático basado en redes neuronales artificiales que utiliza distintas capas de procesamiento con el fin de lograr un aprendizaje abstracto (Misra & Li, 2020). Uno de los campos en donde el aprendizaje profundo tiene un gran impacto es la visión por computadora, a través de desarrollo de algoritmos y modelos que facilitan el procesamiento, la comprensión e interpretación de datos visuales del mundo real (Khan & Al-Habsi, 2020). Para generar soluciones de clasificación basadas en DL, es necesario la creación de modelos. La clasificación, en aprendizaje automático, se refiere a una tarea o proceso de aprendizaje supervisado, cuyo objetivo es asignar datos de entrada a categorías o clases predefinidas o establecidas utilizando un conjunto de datos de entrenamiento correctamente identificado (Pal, 2019). La clasificación de imagen es una de las más relevantes de la aplicación del DL en, donde se asigna una etiqueta de entrada en función de su contenido. En este sentido, el modelo es entrenado con datos etiquetados, es decir cada entrada es asociada a una clase o categoría específica y el modelo deberá aprender a predecir la clase cada vez que se le presentan nuevos datos desconocidos. La clasificación binaria, que se utiliza en este estudio comparativo, a su vez, alude a una tarea de aprendizaje supervisado que busca asignar los datos a una de las categorías llamadas clases, que pueden ser positivo o negativo, verdadero o falso y 1 o 0 (Armoogum & Li, 2019).

2.3 Los modelos

ResNet hace referencia a una arquitectura de red neuronal profunda presentada en 2015, en la cual se utilizan conexiones residuales para aprovechar el aprendizaje en redes muy profundas (He, et al., 2016).

EfficientNet es una arquitectura de red neuronal convolucional que fue creada utilizando *Neural Architecture Search (NAS)*, un método automático que explora el espacio de las arquitecturas para detectar la más eficaz según criterios de precisión y eficiencia. Dicho modelo se concibió para optimizar el costo computacional manteniendo una alta precisión, y a diferencia de los enfoques tradiciones que tienden a incrementar la profundidad de la red, propone un escalamiento uniforme respetando las restricciones o dependencias de recursos, lo que ayuda a obtener modelos más equilibrados y eficaces (Tan & Le, 2019).

MobileNetV3 representa una arquitectura optimizada y concebida buscando la reducción de la complejidad manteniendo una alta precisión en dispositivos móviles. Debido a que las funciones de activación *Swish* y *Sigmoid* son consideradas eficaces, pero exigen grandes cálculos especialmente, se incorporan las versiones cercanas y más rápidas *Hard-Swish* y *Hard-Sigmoid.* Para aligerar o simplificar los cálculos computacionales se reducen los bloques *Squeeze-and-Excitation*, considerados como módulos de atención dedicados a recalibrar los canales de un tensor con base en su importancia (Koonce, 2021).

ViT se trata de una arquitectura que aplica los mecanismos de atención de los *Transformers* a las imágenes. Divide cada imagen en parches, de 16X16, por ejemplo. Se divide en tokens para que después se procese como una secuencia mediante un modelo *Transformer*. ViT se diferencia de las CNN por no utilizar convoluciones. Se destaca por utilizar un enfoque basado en los *Transformers* empleados en el procesamiento del lenguaje natural (NLP), en el que la imagen se trata como una secuencia de tokens, sin convoluciones. El núcleo del *Transformer* es el mecanismo de atención que permite a cada token ponderar la importancia de los demás tokens en la secuencia (Aburass, et al., 2025).

2.4 Entrenamiento

El entrenamiento de las arquitecturas o modelos comparados en este trabajo se realizó creando un núcleo (núcleo de entrenamiento) que permite unificar el flujo de entrenamiento y evaluación para todas las arquitecturas (ResNet18, MobileNetV3, EfficientNet-B0 y ViT), manteniendo y facilitando la trazabilidad, reproductibilidad y comparabilidad entre los modelos. La trazabilidad ayudará a seguir el rastreo de cada experimento, la reproductibilidad permitirá que otros interesados ejecuten el proyecto bajo las mismas configuraciones y obtengan resultados similares, mientras la comparabilidad asegura que todas las arquitecturas que hayan sido probadas se entrenan y evalúan bajo condiciones idénticas. Los parámetros para el entrenamiento incluyen una paciencia de hasta 6 épocas, batch de 32 imágenes, un máximo de 20 épocas, validation split de 15%, un seed de 42 y optimizador Adam

2.4.1 Pérdida: Cross-Entropy con peso de clase

En problemas de clasificación supervisada, especialmente cuando se trabaja con clases desbalanceadas, se recomienda ajustar la función de pérdida *Cross-Entropy* incorporando peso de clase. En este estudio, se ha utilizado la entropía cruzada ponderada (*weighted cross-entropy*) con el propósito de mitigar el desbalance de las clases benignas y malignas, cuya fórmula se define en la ecuación 1.

$$J(\theta) = -\sum_{i=1}^{m}\left[w_{y_i} y_i \log(\hat{y}_i) + (1 - y_i)\log(1 - \hat{y}_i)\right] \quad (1)$$

Donde w_{y_i} corresponde al peso asignado a la clase del ejemplo i. De este modo, los errores en la clase minoritaria, por ejemplo, malignas, reciben mayor penalización durante el entrenamiento, incentivando al modelo a prestar más atención a esos casos. Esta solución es consistente con el uso de CrossEntropyLoss en PyTorch y ha sido documentada como eficaz en escenarios con desequilibrio de clases (Goodfellow, et al., 2016).

En el dominio de las imágenes médicas, numerosas investigaciones recientes han aplicado esta estrategia buscando mejorar la sensibilidad en tareas de clasificación o segmentación con clases minoritarias, entre ellas "*Loss Weightings for Improving Imbalanced Brain Structure Segmentation Using Fully Convolutional Networks*", en donde se introdujo una estrategia de ponderación de la función de pérdida (*loss weighting*) aplicada a una red neuronal completamente convolucional (FCN), (Sugino, et al., 2021).

2.4.2 Ajuste del learning rate: ReduceLROnPlateau

La estrategia de ReduceLROnPlateau de PyTorch se utilizó para optimizar el entrenamiento, logrando así un monitoreo del AUC en validación como principal métrica. Al no observarse una mejora significativa después de épocas consecutivas, el *learning rate* (LR) se redujo a la décima parte de su valor actual (*factor = 0.1*), con un límite inferior de 10^{-6} (*min_lr*). Esto ha ayudado a evitar el estancamiento en mesetas de rendimiento y mantener la capacidad de refinamiento.

La elección de un factor de 0.1 en lugar de valores más conservadores (p. ej. 0.5) responde a que en *datasets* médicos relativamente pequeños, una reducción más marcada favorece la estabilización temprana del aprendizaje y reduce el riesgo de sobreajuste prolongado (Shin, et al., 2016; Litjens, et al., 2017; Lundervold & Lundervold, 2018)

2.4.3 Entrenamiento con épocas y detención temprana

El proceso de entrenamiento se planeó para un máximo de 20 épocas, sin embargo, se estableció la técnica de *early stopping* como criterio de finalización anticipada, en donde se define que el proceso debe detenerse cuando el AUC en validación no muestra mejora durante 6 épocas consecutivas, considerando un parámetro *patience de 6* y un margen mínimo de 0.001 (min_delta). La implementación de este esquema ha permitido el máximo aprovechamiento del potencial de la mejora de los modelos sin incurrir en un sobre-entrenamiento prolongado. En efecto, este enfoque proporciona un balance entre explorar el número completo de épocas y detener el entrenamiento de manera oportuna y eficiente cuando los modelos alcanzan su punto óptimo de generalización.

También se generaron las curvas de entrenamiento (loss, val_acc, val_auc, lr), curva ROC y curva Precision-Recall (AUC-ROC, AUC-PR) y Matriz de confusión

La generación del núcleo común y las demás herramientas auxiliares han permitido que comparar de manera equitativa las distintas arquitecturas de aprendizaje profundo aplicándolas sobe imágenes DICOM, garantizando el control de sesgos, la trazabilidad de los resultados y el alineamiento con los objetivos clínicos, como lo es la priorización del *recall*. La figura 3 resume la metodología utilizada para el desarrollo.

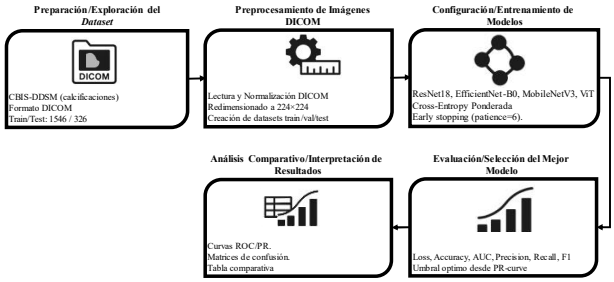


Figura 3. Metodología aplicada

3. RESULTADOS Y/O CONSIDERACIONES

Las métricas generadas y graficadas sobre las cuales se basa la comparación de los modelos son esencialmente *loss*, *accuracy* y *AUC*. Dentro de estas, se ha utilizado el *AUC* en la validación como el principal criterio para guardar el mejor modelo, por su robustez cuando se trabaja con clases desbalanceadas. Aunado a esto, se reportaron *precision*, *recall* y *F1-score*, las cuales pueden contribuir o facilitar el proceso de interpretación clínica, haciendo especial énfasis en la importancia de maximizar la sensibilidad en la detección de casos malignos. Para calcular estas métricas, el umbral de decisión se ha optimizado con base en las curvas de precision-recall, eligiendo aquel que ofrece el mejor equilibrio entre sensibilidad y precisión.

Como se puede observar en la figura 4 de las curvas ROC, el modelo ResNet18 demuestra haber obtenido la mejor área bajo la curva (AUC = 0.763), confirmando y destacando una capacidad para discriminar superior a las demás arquitecturas. El modelo ViT_b16 alcanza un rendimiento ligeramente inferior (AUC = 0.752), mientras que MobileNetV3 y Efficienmet-B0 presentan un rendimiento 0.739 aproximadamente.

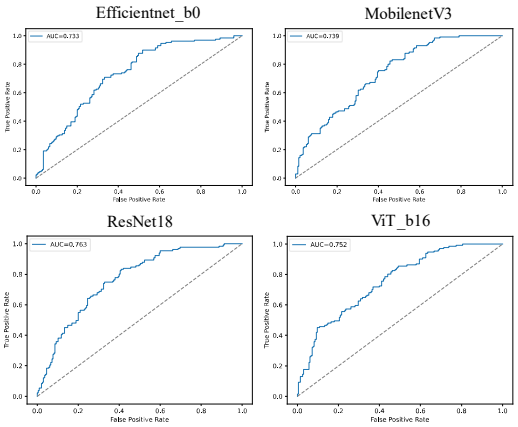


Figura 4. Curvas ROC de los 4 modelos

Las curvas *precision-recall* que se muestran en la figura 5 resaltan un aspecto complementario: MobileNetV3 y EfficientNet-B0 presentan un *recall* particularmente elevado (0.931 y 0.901 respectivamente), lo que disminuye considerablemente el riesgo de falsos negativos, sin embargo, a expensas de una reducción de la precisión. En cambio, ResNet18 demuestra un mejor balance o equilibrio entre precision y recall, obteniendo el mejor F1-score (0.681) y el mejor *accuracy* (0.687). Dichos resultados evidencian una compensación inherente entre las diferentes arquitecturas, maximizando el recall para ciertos modelos sacrificando otros aspectos generales de otros.

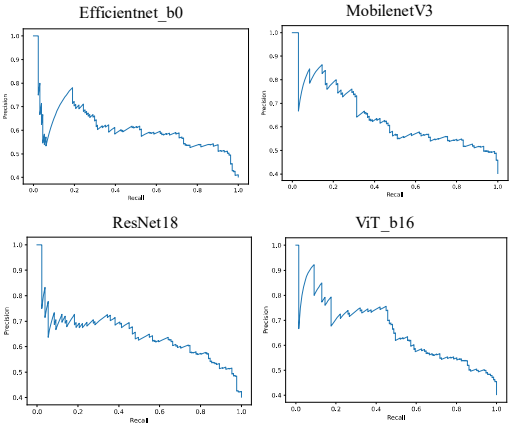


Figura 5. Curvas de *precision-recall* de los 4 modelos

La matriz de confusión del modelo ResNet18 que se puede observar en la figura 6, ilustra concretamente dicho equilibrio. Se puede destacar una gran proporción de verdaderos positivos y verdaderos negativos, teniendo especial cuidado en limitar los falsos positivos y falsos negativos. En comparación con las matrices de los otros modelos, ResNet18 demuestra y refleja su aspecto robusto en la detección de casos malignos sin perder excesivamente las especificaciones.

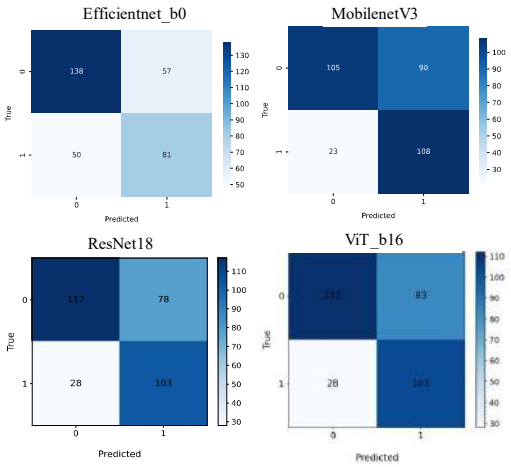


Figura 6. Matriz de confusión de los 4 modelos

Por último, la figura 7 de las curvas de aprendizaje, el modelo ResNet18 muestra una aproximación más estable del entrenamiento con una disminución regular de la función de pérdida y una mejora progresiva del AUC de la validación. La aplicación de la técnica de early stopping y un ajuste dinámico de la tasa de aprendizaje (ReduceLROnPlateau) ha contribuido en evitar el sobreaprendizaje y garantizar una mejor generalización.

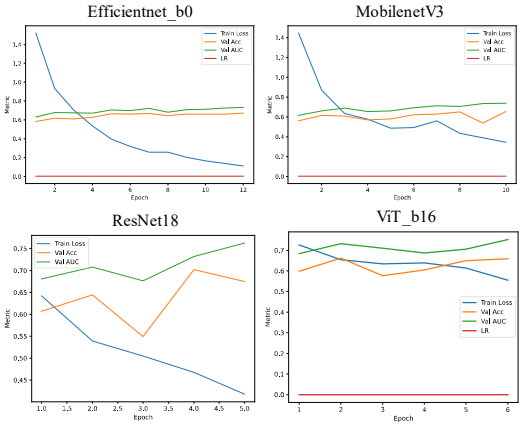


Figura 7. Curvas de aprendizaje de los 4 modelos

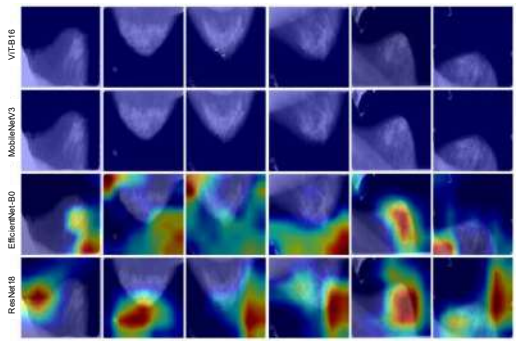


Figura 8. Ejemplos de evaluación con GradCam para evaluación cualitativa

Además, con el fin de interpretar visualmente las regiones que influyen en la decisión de cada modelo, se aplicó la técnica *Gradient-weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM)* (Selvaraju, et al., 2017,) sobre ejemplos representativos de la base de datos. La figura 8 muestra un conjunto de cuatro ejemplos —uno por cada arquitectura evaluada (ResNet18, EfficientNet-B0, MobileNetV3 y ViT)— en los que se resaltan las áreas de mayor activación relacionadas con las microcalcificaciones detectadas. Esta visualización permite confirmar que los modelos con mejor desempeño no sólo alcanzan métricas más altas, sino que también focalizan su atención en las regiones anatómicamente relevantes, aportando evidencia cualitativa adicional sobre la interpretabilidad y coherencia del aprendizaje.

Grad-CAM (*Gradient-weighted Class Activation Mapping*) (Chattopadhay, et al., 2018) es una técnica de visualización que permite interpretar el funcionamiento interno de las redes neuronales convolucionales al generar mapas de activación ponderados por gradiente. A partir de las derivadas de la clase objetivo respecto a los mapas de características de una capa convolucional, Grad-CAM resalta las regiones de la imagen que más contribuyen a la decisión del modelo, facilitando así la comprensión de su comportamiento y la validación visual de que la atención del modelo se centra en las zonas anatómicamente relevantes.

Por lo tanto, estos resultados parecen indicar y demostrar que ResNet18 puede ser considerado, la opción más adecuada o recomendada para una clasificación sólida, mientras que MobileNetV3 y EfficienNet son más adecuados y apropiados para un contexto clínico donde se prioriza el *recall*, es decir, la detección del mayor número de casos malignos posible. A continuación, se presenta el resumen del estudio comparativo en la tabla 2.

Tabla 2. Resumen

Modelo	AUC ROC	F1-score	Precisión	Sensibilidad (Recall)	Exactitud (Accuracy)
ResNet 18	0.763	0.681	0.577	0.832	0.687
ViT_B 16	0.752	0.661	0.538	0.855	0.647
Mobile NetV3	0.739	0.665	0.517	0.931	0.623
Efficie ntNet_ B0	0.733	0.674	0.539	0.901	0.650

4. CONCLUSIÓN

Este trabajo de investigación ha permitido la exploración y comparación de varias arquitecturas de redes neuronales profundos aplicadas a la clasificación de microcalcificaciones mamarias, utilizando un conjunto de datos médicos estandarizado como lo es CBIS-DDSM. El objetivo primordial de determinar cuál es el modelo que ofrece el mejor rendimiento en cuestiones de robustez, precisión y sensibilidad, respectando siempre los límites relativos al ámbito de la medicina, en donde el valor de *recall* es un criterio fundamental para evitar el infradiagnóstico de casos malignos.

Los resultados experimentales demuestran que el modelo ResNet18 se distingue por su estabilidad y equilibrio entre las diferentes métricas. Con un AUC de 0.763 y un F1-score de 0.681, supera a las otras arquitecturas probadas, lo que confirma la importancia de su proceso de conexiones residuales para tratar de manera eficiente datos complejos y desbalanceados. No obstante, los modelos MobileNetV3 y EfficientNet-B0 destacan por su capacidad y contribución en reducir de forma significativa el riesgo de falsos negativos, un aspecto crucial para las aplicaciones clínicas. Por su parte, los resultados de Vision Transformer (ViT) son muy prometedores, similares o cercanos a los de ResNet18, demostrando el potencial de los enfoques basados en los mecanismos de atención para el análisis de imágenes médicas.

Sin embargo, para fortalecer la validez de estas conclusiones, se identificó la necesidad de incorporar un análisis estadístico más robusto que respalde las diferencias observadas entre arquitecturas. En futuros trabajos se propone realizar pruebas de significancia (p. ej., DeLonge test) sobre los resultados de AUC, con el fin de determinar si las diferencias en rendimiento son estadísticamente relevantes y no atribuibles al azar.

Este estudio también ilustra algunas consideraciones metodológicas esenciales como la importancia del tratamiento del desbalanceo de clases para poder ponderar la función de pérdida, las estrategias dinámicas de optimización de la tasa de aprendizaje, así como la eficiencia de la técnica de early stopping para prevenir el sobre-aprendizaje y mejorar la generalización de los modelos. Dichos elementos resaltan que el rendimiento de un modelo no depende únicamente de la arquitectura, sino también del carácter riguroso y la pertinencia en elegir las metodologías para realizar el entrenamiento.

Una contribución adicional de esta investigación consiste en la transparencia del flujo de trabajo (*pipeline*) empleado, el cual se documenta completamente en un repositorio público que permite la reproducción de los experimentos y la verificación de los resultados obtenidos. Este enfoque de ciencia abierta refuerza la credibilidad del estudio y facilita la extensión de sus hallazgos por otros investigadores (Virtielo, 2025).

Desde una consideración práctica, este trabajo refleja el potencial de las redes de aprendizaje profundo como herramientas de ayuda en el diagnóstico en radiología mamaria. Al facilitar una detección oportuna y fiable de microcalcificaciones, estos enfoques podrían contribuir a reducir o evitar los procedimientos de biopsias invasivas, mejorar la atención a los pacientes y probablemente disminuir la mortalidad relacionada a los casos de cáncer de mama. Es importante señalar que, aunque estos resultados son alentadores, se deben validar por estudios más amplios y en contextos clínicos reales y adecuados. No obstante, los resultados deben interpretarse con cautela, pues su

generalización requiere validación en entornos clínicos reales, con poblaciones más amplias y datos obtenidos de múltiples centros hospitalarios.

Para finalizar, la comparación realizada en esta investigación ha permitido confirmar que, si el aprendizaje profundo se aplica de manera correcta, con metodologías rigurosas y con los conjuntos de datos adecuados, representa un avance significativo para el diagnóstico asistido por computadora. ResNet18, parece ser la mejor opción en este contexto específico, sin embargo, la evolución acelerada de las arquitecturas particularmente basadas en Transformers, ofrece perspectivas alentadoras para las generaciones próximas de sistemas de ayuda al diagnóstico médico. Este estudio aporta una comparación metodológicamente estructurada entre arquitecturas representativas del aprendizaje profundo, proponiendo una base reproducible para futuras investigaciones. Si bien ResNet18 se posiciona como la opción más equilibrada dentro del marco experimental planteado, la rápida evolución de modelos basados en transformadores abre perspectivas prometedoras para el desarrollo de sistemas diagnósticos asistidos de nueva generación

REFERENCIAS

Aburass, S. et al., 2025. Vision Transformers in Medical Imaging: a Comprehensive Review of Advancements and Applications Across Multiple Diseases. Journal of Digital Imaging.

Armoogum, S. & Li, X., 2019. Chapter 2 - Big Data Analytics and Deep Learning in Bioinformatics With Hadoop. In: A. K. Sangaiah, ed. Deep Learning and Parallel Computing Environment for Bioengineering Systems. s.l.:Academic Press, pp. 17-36.

Baccouche, A., Garcia-Zapirain, B., Castillo Olea, C. & Elmaghraby, A. S., 2021. Connected-UNets: a deep learning architecture for breast mass segmentation. npj Breast Cancer, Volume 7, p. 151.

Briganti, G., 2023. Intelligence artificielle : une introduction pour les cliniciens. Revue des Maladies Respiratoires, 40(4), pp. 308–313.

Chattopadhay, A., Sarkar, A., Howlader, P., & Balasubramanian, V. N. (2018). Grad-CAM++: Generalized Gradient-Based Visual Explanations for Deep Convolutional Networks. *2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 839–847. doi:10.1109/WACV.2018.00097

Goodfellow, I., Bengio, Y. & Courville, A., 2016. Deep Learning. s.l.:MIT Press.

He, K., Zhang, X., Ren, S. & Sun, J., 2016. Deep residual learning for image recognition. s.l., s.n., pp. 770–778.

IARC, s.f.. International Agency for Research on Cancer. [Online]
Available at: https://www.iarc.who.int/cancer-type/breast-cancer/
[Accessed 20 09 2025].

INEGI, 2023. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [Online]
Available at: https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia/8498
[Accessed 20 09 2025].

INSP, 2019. Instituto Nacional de Salud Pública. [Online] Available at: https://www.insp.mx/avisos/5090-octubre-cancer-mama-19.html#sup1
[Accessed 20 09 2025].

Jean, A., 2020. Une brève introduction à l'intelligence artificielle. Médecine/Sciences, 36(11), pp. 1059-1067.

Khan, A. I. & Al-Habsi, S., 2020. Machine Learning in Computer Vision. Procedia Computer Science, Volume 167, pp. 1444-1451.

Koonce, B., 2021. MobileNetV3. In: Convolutional Neural Networks with Swift for TensorFlow. Berkeley, CA: Apress.

Lee, R. S. et al., 2017. A curated mammography data set for use in computer-aided detection and diagnosis research. Scientific Data, Volume 4, p. 170177.

Litjens, G. et al., 2017. A survey on deep learning in medical image analysis. Medical Image Analysis, Volume 42, pp. 60-88.

Lundervold, A. S. & Lundervold, A., 2018. An overview of deep learning in medical imaging focusing on MRI. Zeitschrift für Medizinische Physik, 29(2), pp. 102–127.

Mahmood, T. et al., 2021. An Automatic Detection and Localization of Mammographic Microcalcifications ROI with Multi-Scale Features Using the Radiomics Analysis Approach. Cancers, 13(23), p. 5916.

Matuchansky, C., 2019. Intelligence clinique et intelligence artificielle : une question de nuance. Médecine/Sciences, 35(10), pp. 797–803.

Misra, S. & Li, H., 2020. Chapter 7 - Deep neural network architectures to approximate the fluid-filled pore size distributions of subsurface geological formations. In: Machine Learning for Subsurface Characterization. s.l.:Gulf Professional Publishing, pp. 183-217.

Pal, S., 2019. ECG Monitoring: Present Status and Future Trend. In: R. Narayan, ed. Encyclopedia of Biomedical Engineering. s.l.:s.n., pp. 363-379.

Ranjbarzadeh, R. et al., 2023. ME-CCNN: Multi-encoded images and a cascade convolutional neural network for breast tumor segmentation and recognition. Artificial Intelligence Review, Volume 56, pp. 10099–10136.

Sawyer-Lee, R., Gimenez, F., Hoogi, A. & Rubin, D., 2016. Curated Breast Imaging Subset of Digital Database for

Screening Mammography (CBIS-DDSM) [Data set]. The Cancer Imaging Archive.

Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D., & Batra, D. (2017). Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-Based Localization. *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 618–626. doi:10.1109/ICCV.2017.74

Shin, H.-C.et al., 2016. Deep convolutional neural networks for computer-aided detection: CNN architectures, dataset characteristics and transfer learning. IEEE Transactions on Medical Imaging, 35(5), pp. 1285–1298.

Sugino, T. et al., 2021. Loss Weightings for Improving Imbalanced Brain Structure Segmentation Using Fully Convolutional Networks. Healthcare, 9(8), p. 938.

Su, Y., Liu, Q., Xie, W. & Hu, P., 2022. YOLO-LOGO: A transformer-based YOLO segmentation model for breast mass detection and segmentation in digital mammograms. Computer Methods and Programs in Biomedicine, Volume 221, p. 106903.

Tan, M. & Le, Q. V., 2019. EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks, s.l.: s.n.

Tsochatzidis, L., Koutla, P., Costaridou, L. & Pratikakis, I., 2021. Integrating segmentation information into CNN for breast cancer diagnosis of mammographic masses. Computer Methods and Programs in Biomedicine, Volume 200, p. 105913.

Virtielo. (2025). *BreasteMammoClasification* [Código fuente]. GitHub. https://github.com/Virtielo/BreasteMammoClasification

WHO, 2023. World Health Organization. [Online] Available at: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/breast-cancer? [Accessed 20 09 2025].

WHO, s.f.. World Health Organization. [Online] Available at: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/ [Accessed 20 09 2025].

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Data Augmentation Techniques for Images Containing People: Review of Methods, Efficiency, and Practical Challenges

Pedro Arcos-Méndez * **Jorge Fuentes-Pacheco** *
Raúl Pinto-Elías * **Andrea Magadán-Salazar** *
Nimrod González-Franco *

* *TecNM / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico*
Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México
{m24ce048, jorge.fp, raul.pe, andrea.ms, nimrod.gf}@cenidet.tecnm.mx

Abstract: Deep learning, particularly using convolutional neural networks, has revolutionized computer vision. However, the essential need for extensive labeled data to prevent model overfitting remains a major challenge. Data augmentation is a key solution to increase dataset diversity. This review concentrates on data augmentation strategies specifically tailored for images containing people (e.g., pedestrian detection, human segmentation), a difficult domain due to variability in pose, scale, and occlusion. Distinguishing our work from general reviews, we focus on three crucial practical aspects: domain-specific challenges (like identity preservation), the efficiency of data augmentation for lightweight models, and hardware requirements. We examine techniques from basic geometric/photometric transformations to advanced methods like CutMix, Copy-Paste, and GANs. Our findings emphasize that data augmentation in this area requires delicate balancing to avoid distorting critical features (e.g., human body shape). Furthermore, adaptive and scale-aware strategies (e.g., Scale Match) are indispensable for reliably detecting tiny objects, such as people smaller than 20 pixels.

Keywords: Data Augmentation, Small Person Detection, Lightweight Models, Generative Adversarial Networks.

1. INTRODUCCIÓN

En la última década, las redes neuronales profundas, especialmente las Redes Neuronales Convolucionales (CNN, del inglés *Convolutional Neural Network*), han revolucionado la visión por computadora. No obstante, el rendimiento óptimo de estos modelos está intrínsecamente ligado a la disponibilidad de grandes cantidades de datos (Alomar et al., 2023). Cuando los datos son insuficientes, un problema común en tareas del entrenamiento es el sobreajuste (Alomar et al., 2023; Frid-Adar et al., 2018).

El dominio de las imágenes de personas presenta desafíos únicos, tareas como la detección de peatones, la segmentación humana o la reidentificación de personas operan en escenarios de alta complejidad, incluyendo variaciones extremas de pose, escala y oclusión (Yu et al., 2019; Fan et al., 2023; Chen et al., 2023).

El Aumento de Datos (DA, del inglés *Data Augmentation*) es una estrategia que consiste en generar nuevas instancias de entrenamiento mediante la modificación de datos existentes, manteniendo la precisión de la etiqueta original (Alomar et al., 2023; Islam et al., 2024). Esto permite que los modelos aprendan representaciones más complejas y confiables, mejorando su capacidad de generalización. Las estrategias de aumento varían en complejidad, las transformaciones básicas aplican cambios geométricos y fotométricos, y los métodos avanzados emplean modelos de aprendizaje profundo que generan imágenes artificiales.

1.1 Motivación y contribución

Este trabajo emplea una revisión de la literatura enfocada en las estrategias de DA aplicadas a imágenes que contienen personas, incluyendo detección de peatones, segmentación semántica de cuerpos humanos y detección de rostros. A diferencia de las revisiones generales, la metodología de análisis se centra rigurosamente en la viabilidad de la implementación del DA, evaluando los hallazgos de la literatura según tres pilares prácticos:

(1) **Desafíos específicos del dominio:** ¿Cómo afectan las técnicas de DA a las características críticas del cuerpo humano, como la forma y la identidad? Se discuten los riesgos de la distorsión de la forma en la segmentación de humanos y el dilema de preservar la información contextual.
(2) **Eficiencia para usarse en modelos ligeros:** Se evalúa la viabilidad de implementar estrategias de DA en arquitecturas diseñadas para entornos con recursos limitados.
(3) **Requerimientos de hardware:** Se cuantifica el costo computacional real de las técnicas de DA más avanzadas.

La contribución principal de esta revisión es proporcionar una perspectiva orientada sobre la implementación práctica del enfoque DA en la detección y segmentación de personas, y ofrecer una clasificación de las técnicas bajo estos criterios. Para la validación de este enfoque, se extraen ejemplos y resultados empíricos directamente de la literatura que aborda el uso de conjuntos de datos de personas, como *Supervisely Person* (Supervisely, 2018), *TinyPerson* (Yu et al., 2019) y conjunto de datos de detección de peatones como *CityPersons* (Zhang et al., 2017b) y *Caltech* (Li et al., 2022).

2. CLASIFICACIÓN DE TÉCNICAS DE AUMENTO DE DATOS EN IMÁGENES

De acuerdo con Kumar et al. (2024), el DA se puede clasificar en dos ramas principales: aumento básico de imágenes y aumento avanzado de imágenes . Los métodos tradicionales implican manipulaciones básicas como transformaciones geométricas; rotación, volteo, recorte, y transformaciones fotométricas; ajuste de brillo o ruido (Islam et al., 2024; Liu et al., 2023; Tong and Wu, 2022). Por otro lado, los métodos avanzados a menudo recurren al aprendizaje profundo o mecanismos de búsqueda automatizada.

2.1 Aumento de datos en clasificación y segmentación

El DA ha sido investigado extensivamente en tareas de clasificación y segmentación. Por ejemplo, en tareas de segmentación, técnicas como *ObjectAug* operan a nivel de objeto, desacoplando la imagen en objetos individuales y fondo, aumentando cada objeto individualmente (escalado, rotación y desplazamiento) utilizando el método *inpainting* para restaurar artefactos de píxeles antes de reincorporar el fondo, tal como se muestra en la Figura 1 (Alomar et al., 2023; Kumar et al., 2024).

En el dominio de imágenes de personas, Alomar et al. (2023) realizó segmentaciones utilizando el conjunto de datos *Supervisely Person*, donde analizó el impacto de

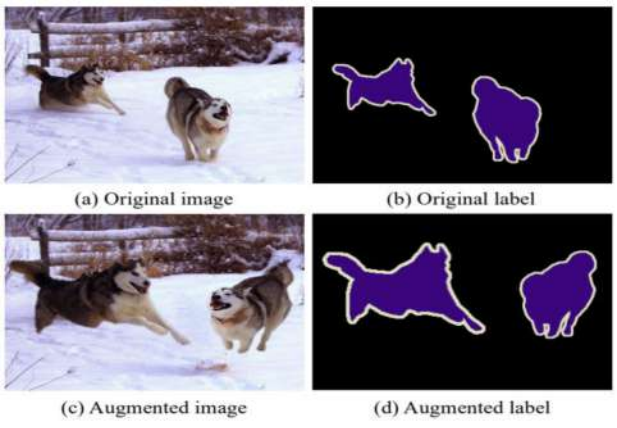


Fig. 1. Segmentación con la técnica *ObjectAug*: el husky izquierdo se escala y cambia, mientras que el derecho se voltea y cambia. Por lo tanto, los límites entre los objetos se aumentan ampliamente para aumentar su rendimiento (Kumar et al., 2024).

las diferentes técnicas de rotación: *Random Local Rotation* (RLR), *Traditional Rotation* (TR), *Random Centre Rotation* (RCR), *Random Reflect Rotation* (RRR), *Random Wrap Rotation* (RWR) y *Random Nearest Neighbor Rotation* (RNR). En la Figura 2 Las filas uno y dos son las muestras aumentadas con segmentación del cuerpo humano correspondiente.

2.2 Aumento de datos para detección de personas

En tareas de detección de objetos, el DA es más difícil de diseñar que en tareas de clasificación, ya que debe considerar no solo el cambio de píxeles, sino también el mantenimiento preciso de las etiquetas de las cajas delimitadoras (Tong and Wu, 2022). Para problemas complejos como la detección de objetos pequeños (*Small Object Detection*), el DA no solo mitiga la insuficiencia de ejemplos de objetos pequeños, sino que también mejora el desequilibrio de categorías en la función de perdida (Tong and Wu, 2022).

Los métodos de *Copy-Paste* son especialmente relevantes en la detección y segmentación de instancias. Este método implica cortar instancias de objetos (con máscaras de instancia) y pegarlas en nuevas imágenes de fondo (Yu et al., 2023; Dwibedi et al., 2017; Ge et al., 2023; Zhao et al., 2023). En la Figura 3 muestra el proceso de entrenamiento con la técnica *Copy-Paste with Self-Adaptation* (CPA) porpuesto por (Yu et al., 2023), esta técnica utiliza los resultados de evaluación del modelo inicial y la información sobre el desequilibrio de clases para guiar la generación de un nuevo conjunto de datos. Durante esta fase, las instancias de objetos se copian y pegan sobre las imágenes de fondo existentes, y se aplica frecuentemente un escalado para incrementar la diversidad del conjunto de datos y prevenir problemas de sobreajuste o subajuste.

El objetivo de la técnica CPA es obtener la cantidad óptima de relleno de instancias por clase basándose en el rendimiento de identificación del modelo (Yu et al., 2023; Zhang et al., 2023). La técnica *Copy-Paste* ha demostrado ser confiable y efectivo, especialmente para categorías atípicas en distribuciones de cola larga, y puede implementarse sin sobrecargas de entrenamiento o inferencia (Ghiasi et al., 2021).

Para la detección de personas, se ha demostrado la eficacia de estrategias de *Scale Match* (Yu et al., 2019). En la Figura 4 se observa que *Scale Match* alinea las escalas de los objetos entre el conjunto de datos de pre-entrenamiento y el conjunto de datos objetivo (*TinyPerson*), lo que resulta en una representación favorable de instancias que ocupan un área de píxeles limitada y un aumento significativo en el desempeño del modelo.

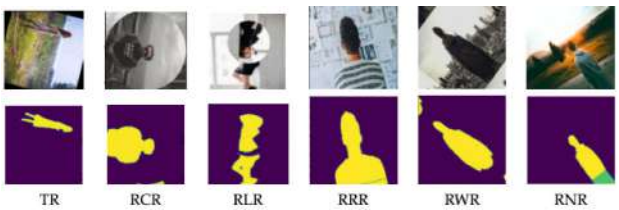


Fig. 2. Muestras del conjunto de datos *Supervisely Person* aplicando técnicas de rotación. (Alomar et al., 2023).

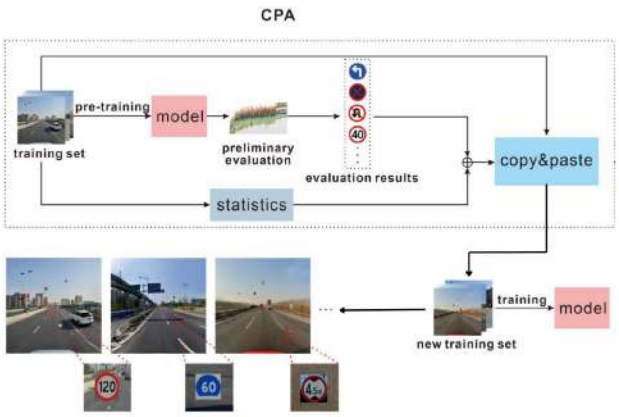


Fig. 3. Flujo de optimización CPA: los resultados del pre-entrenamiento y el desequilibrio de clases se combinan para generar un nuevo conjunto de datos. (Yu et al., 2023).

Fig. 4. Resultados de detección de personas usando la estrategia de *Scale Match* (Yu et al., 2019).

3. ASPECTOS PRÁCTICOS NO CONSIDERADOS EN EL AUMENTO DE DATOS PARA IMÁGENES DE PERSONAS

La implementación de las técnicas de DA conlleva importantes consideraciones prácticas. Por ello, un análisis riguroso debe ir más allá del rendimiento puro y evaluar la viabilidad y los costos asociados a su aplicación.

3.1 Requerimientos de hardware y costo computacional

El costo computacional de las técnicas de DA varía drásticamente, desde métodos tradicionales de bajo costo hasta métodos avanzados que consumen muchos recursos computacionales (Kumar et al., 2024).

Costo de búsqueda de políticas óptimas: La búsqueda de políticas de DA óptimas, como *AutoAug* (Chen et al., 2021), es notoriamente costosa computacionalmente. Por ejemplo, *AutoAug-det* requirió 800 días de Unidad de Procesamiento Tensorial (TPU, del inglés *Tensor Processing Unit*) para la búsqueda. A pesar de este alto costo, las políticas resultantes ofrecen mejoras significativas en la Precisión Media (AP, del inglés *Average Precision*), la métrica estándar para evaluar el desempeño en la detección de objetos, como se observa en la Tabla 1. Sin embargo, este requisito computacional impone una barrera de entrada para la mayoría de los investigadores o desarrolladores con recursos limitados.

Tabla 1. Comparación con *AutoAug-det* en *Retinanet* y *ResNet-50* (Chen et al., 2021).

Método	**Costo (Días)**	**AP**	**AP$_s$**	**AP$_m$**	**AP$_l$**
AutoAug-det	800 (TPU)	36.7 → 39.0	–	–	–
AutoAug-det*	800 (TPU)	38.2 → 40.3	23.6	43.9	53.8
Ours (Propuesto)	20 (GPU)	**38.2 → 41.3**	**25.2**	**44.5**	**54.6**

Costo de los modelos generativos: El uso de Redes Generativas Adversarias (GANs, del inglés *Generative Adversarial Networks*) y modelos de difusión para crear imágenes sintéticas o traducir imágenes, también implica un aumento en los requisitos de *hardware* y tiempo de entrenamiento (Kumar et al., 2024). Las GANs se utilizan para generar datos sintéticos, como imágenes médicas o rostros (Alomar et al., 2023). En aplicaciones de segmentación 3D, el uso de técnicas de *Copy-Paste* con plausibilidad física como *3D Copy-Paste* requiere estimar la iluminación variable espacial y evitar colisiones (Yu et al., 2023). En la generación de escenas 3D, el proceso de optimización para generar datos puede requerir una arquitectura de doble Unidad de Procesamiento Gráfico (GPU, del inglés *Graphics Processing Unit*) (Yang et al., 2024).

Intercambio y soluciones de bajo costo: Las transformaciones geométricas y no geométricas básicas ofrecen ganancias de rendimiento moderadas con baja complejidad computacional (Kumar et al., 2024). Por ello han propuesto soluciones que minimizan la sobrecarga computacional:

(1) **Estrategias de saliencia:** Métodos como *SaliencyMix* (Uddin et al., 2021) y *SalifMix* (Choi et al., 2021) introducen un bajo costo computacional debido a la detección de saliencia, pero logran mejoras significativas. En comparación, el tiempo de entrenamiento de *SaliencyMix* fue de 0.91 horas frente a 0.83 horas para el modelo base en CIFAR-10 con ResNet-18. *KeepAugment* (Gong et al., 2021) también utiliza saliencia para preservar regiones importantes.

(2) ***You Only Cut Once* (YOCO):** Han et al. (2022) introducen un método libre de parámetros y fácil de usar que divide la imagen en dos piezas, aplica DA individualmente y luego las concatena. Su simplicidad y efectividad demuestran que las estrategias minimalistas pueden proporcionar aumentos de rendimiento en la detección.

(3) ***Test-Time Augmentation* (TTA):** Si bien puede mejorar la fiabilidad, TTA añade un costo computacional y puede generar un cuello de botella en modelos que requieren predicción en tiempo real (Shorten and Khoshgoftaar, 2019).

3.2 Eficiencia para modelos ligeros

La eficiencia es primordial cuando se implementan modelos en plataformas con recursos limitados o en dispositivos de bajo consumo o embebidos (Liu et al., 2023). Las técnicas de DA deben ser compatibles o incluso diseñadas para mejorar el rendimiento de los modelos ligeros.

Uso de arquitecturas eficientes: La integración de arquitecturas eficientes como *EfficientNet-b2* que es red de extracción de características en modelos como YOLO_EC ha demostrado ser efectiva (Fan et al., 2023). Esta combinación redujo el peso del modelo a una cuarta parte de su tamaño original, al mismo tiempo que aumentó significativamente la velocidad de detección de Fotogramas por Segundo (FPS, del inglés *Frames per Second*) de 14.7 a 24.3, como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de los experimentos de ablación con conjunto de pruebas (Fan et al., 2023).

Modelo	mAP/%	Params/M	FPS
YOLOv4	91.81	256.3	14.7
YOLO-EfficientNet	91.08	66.4	24.3
YOLO-EfficientNet+CA	94.79	66.5	24
DA+YOLOv4	93.88	256.3	14.7
DA+YOLO_EC	96.35	66.5	24

Diseño para *Edge Computing*: La integración de detectores diseñados para operar en tiempo real en dispositivos embebidos (*Edge-Real-Time*) como *EdgeYOLO* (Liu et al., 2023) utilizan el DA para reducir el sobreajuste en el entrenamiento y estructuras re-parameterizadas con el fin reducir el tiempo de inferencia. *EdgeYOLO* puede alcanzar la detección en tiempo real (FPS $\geq$ 30) en dispositivos como la Nvidia Jetson AGX Xavier, en la Figura 5 se observa la gráfica de comparación de modelos de detección de objetos en tiempo real. Para obtener una comparación justa, * representa los resultados sin utilizar *self-distillation* durante el entrenamiento.

Otro ejemplo es la arquitectura del modelo *RHF-Net*, diseñado para la detección de objetos pequeños en dispositivos embebidos (Tong and Wu, 2022). Este modelo utiliza operaciones con bajo costo computacional para la preservación de características en su módulo de fusión garantizando la eficiencia y precisión en la detección.

Importancia del DA en modelos ligeros: El DA es fundamental para incrementar el desempeño en estos contextos. Una estrategia mejorada de DA en el modelo *EdgeYOLO* ayuda a garantizar la cantidad y validez de los datos de entrenamiento (Liu et al., 2023). En el modelo YOLO_EC para la detección de residual de características, el DA combinado con la optimización de la red incrementó el resultado de la Precisión Media Promedio (mAP, del inglés *mean Average Precision*) de 4.45% a 96.35%, logrando un modelo ligero y mejorando la eficiencia de detección simultánea (Fan et al., 2023).

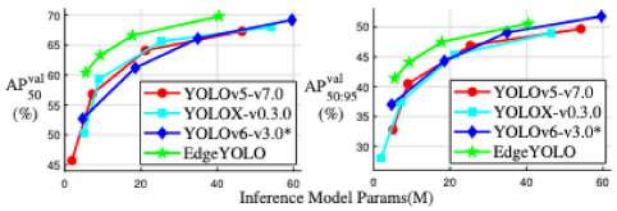


Fig. 5. Comparación del desempeño de EdgeYOLO con algunos detectores populares de objetos en tiempo real (Liu et al., 2023).

3.3 Desafíos de dominio: preservación de identidad y contexto

Al trabajar con imágenes de personas, las técnicas de DA requieren una consideración metodológica rigurosa para no comprometer la identidad del objeto ni distorsionar el contexto (Zhang et al., 2023).

Preservación de la forma *vs.* distorsión: Se ha observado que las CNN entrenadas con *ImageNet* tienden a sesgarse hacia la textura en lugar de la forma. La distinción de características entre forma y textura es fundamental, especialmente en la segmentación de imágenes de personas (Alomar et al., 2023).

Un ejemplo crítico surge de la estrategia de RLR propuesta por Alomar et al. (2023), esta estrategia selecciona aleatoriamente la ubicación y el tamaño de regiones circulares para rotarlas, lo que evita los bordes irregulares o negros que resultan de la rotación tradicional. Aunque RLR superó a su contraparte tradicional en clasificación, en el experimento de segmentación utilizando el conjunto de datos *Supervisely Person*, se observó que el método RLR distorsionaba más la forma del cuerpo humano, resultando en un rendimiento ligeramente inferior al de la rotación tradicional. Esto indica que en tareas donde la forma es crucial (como la segmentación o la detección), las transformaciones que alteran la estructura del objeto pueden degradar el rendimiento del modelo.

Para contrarrestar el sesgo de textura, el método *Cut-Thumbnail* propuesto por Xie et al. (2021), busca mejorar el sesgo de forma en las CNNs. Al reducir una imagen a un *thumbnail* que conserva la información global de forma y reemplaza una región aleatoria, se fuerza a la red a percibir más información de forma, beneficiando la clasificación de objetos.

Preservación contextual de la técnica *Copy-Paste*: De acuerdo con Zhao et al. (2023) y Dwibedi et al. (2017) el método *Copy-Paste* básico, el cual pega objetos segmentados en fondos aleatorios, puede crear artefactos de píxeles o perder la información contextual . Esta perdida contextual es un problema significativo, especialmente para la detección de objetos pequeños en las imágenes, donde el modelo pierde información de fondo crucial para el aprendizaje del modelo (Yu et al., 2023).

Para abordar este problema, se han propuesto enfoques sensibles al contexto:

(1) ***BIB-Copy-Paste***: Este modelo propuesto por Zhang et al. (2023) garantiza que las instancias copiadas se peguen en regiones que coincidan con la información contextual. El modelo genera pseudo-etiquetas de fondo y entrena un clasificador para guiar el proceso de pegado, por ejemplo, pegar vehículos en una imagen de fondo de carreteras.

(2) ***Copy-Paste with Self-Adaptation***: Este método propuesto por Yu et al. (2023) busca la cantidad óptima de relleno de instancias por clase basándose en el rendimiento de identificación del modelo durante el pre-entrenamiento. Aunque mejora el desequilibrio de clases, los autores reconocen que el DA basada en *Copy-Paste* tradicional pierde la información contextual de la imagen, lo que puede llevar a una ligera disminución en el rendimiento de detección de objetos pequeños.

(3) **Desafíos específicos de escala y oclusión en personas:** La detección de peatones a menudo se ve obstaculizada por la oclusión y la gran variación de escala (Liu et al., 2022). Para los objetos diminutos, como las personas en el conjunto de datos *TinyPerson*, es crucial compensar el desajuste de escala que ocurre entre el pre-entrenamiento y el conjunto de datos objetivo (Yu et al., 2019). Las técnicas de *Scale Match* propuesto por Yu et al. (2019) abordan este problema, específicamente en la detección de personas de escalas pequeñas presentes en las imágenes.

4. MÉTODOS DE AUMENTO DE DATOS Y SU APLICACIÓN PARA EL DOMINIO DE PERSONAS

4.1 Transformaciones geométricas locales y regulares

Las transformaciones geométricas básicas como rotación, volteo, escalado, son los métodos de DA más comunes y con baja complejidad computacional (Tong and Wu, 2022; Kumar et al., 2024). Sin embargo, la aplicación de estas transformaciones debe considerar el impacto en las etiquetas.

El método RLR introduce una variación importante al seleccionar aleatoriamente la ubicación y el tamaño de regiones circulares en la imagen para rotarlas con ángulos aleatorios (Alomar et al., 2023). Esto se propone como una alternativa a la rotación tradicional, la cual genera bordes irregulares o áreas negras en las esquinas y conlleva el recorte de las esquinas originales de la imagen como se muestra en la Figura 6.

Los experimentos que utilizaron RLR en el conjunto de datos *Supervisely Person* mostraron que la distorsión de la forma que introdujo RLR afectó negativamente el rendimiento en la tarea de segmentación. Este resultado subraya un principio crucial: en el contexto de imágenes de personas, el impacto de las transformaciones en la preservación de la forma es un factor determinante, especialmente cuando la tarea exige la delimitación precisa de contornos, como ocurre en la segmentación.

Fig. 6. Rotación tradicional. Izquierda y derecha: la imagen dada y la imagen girada con un ángulo rotado aleatorio (Alomar et al., 2023).

Para facilitar la comprensión y el contraste rápido de estas técnicas de bajo costo computacional, la Tabla 3 presenta un resumen comparativo de las rotaciones y transformaciones geométricas relacionadas, enfocándose en su impacto en el dominio de imágenes de personas.

4.2 Aumento de datos basado en modelos generativos

Los modelos generativos, como las GANs y los modelos de difusión como *AutoAugment*, se utilizan para crear datos sintéticos, mitigando la escasez de datos (Islam et al., 2024).

Uso de GANs en imágenes de personas: La *Deep Convolutional GAN* (DCGAN) se utiliza para generar muestras de alta calidad, aprovechando la capacidad de extracción de características de las CNN para mejorar la estabilidad del entrenamiento y la calidad de las muestras generadas (Fan et al., 2023). Aunque el enfoque ha sido popular en el dominio médico y para la detección de objetos pequeños (Islam et al., 2024; Tong and Wu, 2022; Liu et al., 2022), su aplicación directa para la generación de rostros ha sido explorada sin aplicar DA adicional a las imágenes originales (Radford et al., 2016).

En la detección de peatones en condiciones nocturnas o limitadas, Liu et al. (2022) propuso el modelo *Residual Convolutional GAN* (RCGAN), una mejorada basada en DCGAN que permite generar imágenes nuevas como se observa en la Figura 7, en la mayoría de los casos se pueden detectar personas en las imágenes generadas. La autenticidad de los resultados se puede determinar por la forma de la figura humana de mayor tamaño, lo que expande significativamente el conjunto de datos y mejora la mAP en detección de peatones.

Modelos de difusión y escalabilidad: La estrategia *Copy-Paste* se está volviendo escalable gracias a los modelos generativos de texto a imagen como *text2image* y *StableDiffusion*, y los modelos de reconocimiento *zero-shot* como CLIP (Zhao et al., 2023). *X-Paste* utiliza S*tableDiffusion* para generar imágenes diversas con diferentes apariencias y puntos de vista, además utiliza CLIP para filtrar imágenes reales con ruido, lo que permite la adquisición de instancias a gran escala para *Copy-Paste*. Esta combinación es crucial para las categorías atípicas (*long-tail categories*), donde *X-Paste* demostró mejoras significativas en la métrica AP^{mask} como se observa en la Tabla 4. Esto demuestra que usar solo 100,000 instancias

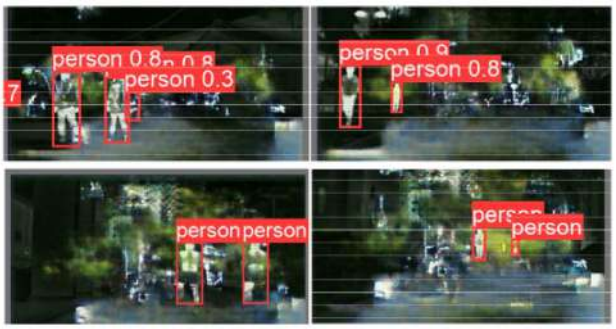


Fig. 7. Nuevas imágenes generadas por RCGAN (Liu et al., 2022).

Tabla 3. Transformaciones geométricas locales y regulares.

Técnica	Característica	Ventajas	Desventajas y costo computacional	Impacto en imágenes de personas
Volteo (*Flip*)	Reflejo de las imágenes horizontal o verticalmente.	Técnica de baja complejidad computacional. La más utilizada es la horizontal por ser más realista.	Debe considerarse el impacto en las etiquetas y el contexto. El costo computacional es bajo.	Puede resolver parcialmente el problema de punto de vista, mejorando el rendimiento de clasificación.
Rotación Tradicional (TR)	Rotación simple de la imagen.	Baja complejidad computacional.	Puede crear bordes de imagen irregulares o negros en las esquinas, el costo computacional bajo.	En la segmentación de personas, tiene un rendimiento ligeramente superior a RLR, ya que no distorsiona la forma del cuerpo de la persona.
Rotación Local Aleatoria (RLR)	Rota regiones circulares aleatorias en la imagen con ángulos aleatorios.	Propuesta para evitar bordes irregulares de TR.	En el experimento de segmentación distorsiona más la forma del cuerpo de la persona, el costo computacional es bajo.	No recomendable para tareas donde la forma es importante.

generadas o instancias reales filtradas de *X-Paste* puede mejorar significativamente el rendimiento del modelo.

Tabla 4. Resultados del uso de diferentes escalas de instancias filtradas en *X-Paste*. #Gen y #Real denotan la cantidad de imágenes generadas a partir de *StableDiffusion* e imágenes reales filtradas por el modelo CLIP (Zhao et al., 2023).

# Gen	# Real	AP^{box}	AP^{mask}	AP_r^{box}	AP_r^{mask}
0	0	34.5	30.8	24.0	21.6
100k	100k	36.3	32.3	28.0	25.2
150k	150k	36.6	32.7	28.5	26.5
300k	300k	**36.7**	**32.9**	**29.9**	**27.6**

Estas estrategias de DA que utilizan modelos de deep learning o mecanismos de búsqueda automatizada, suelen requerir altos requisitos de hardware y tiempo de entrenamiento. La Tabla 5 compara estos métodos avanzados, destacando la compensación entre la calidad de los datos generados (que mitigan la escasez de datos) y el impacto económico y computacional.

4.3 Estrategias de copiado y pegado sensibles al contexto y al objeto

Los métodos de mezcla y *Cut-Paste* han evolucionado para ser más conscientes de las características de la imagen, utilizando la segmentación o la información de saliencia.

***Mixup, Cutout y CutMix* :** *Mixup* (Zhang et al., 2017a) genera ejemplos virtuales de entrenamiento mediante la interpolación lineal de vectores de características y etiquetas asociadas. *Cutout* (DeVries and Taylor, 2017) consiste en eliminar aleatoriamente una subregión dentro de una imagen y reemplazarla con un valor constante, como 0 o 255, durante la fase de entrenamiento. *CutMix* (Yun et al., 2019) reemplaza una región de una imagen con un parche de otra, mezclando también las etiquetas. Esto ha demostrado ser fiable contra variaciones de entrada y mejorar la generalización. En la Figura 8 se observa un ejemplo general de estas técnicas.

***SaliencyMix*:** Este método propuesto por Uddin et al. (2021) aborda la limitación de la selección aleatoria de parches en *CutMix* que suelen ser poco informativos. *SaliencyMix* utiliza un mapa de saliencia para seleccionar un parche de imagen representativo de la imagen fuente y lo mezcla con la imagen objetivo, logrando la integración visual del elemento saliente en el nuevo contexto (Ver Figura 9). Esto guía al modelo para que se centre en las regiones generales del objeto y evita el aprendizaje de representaciones inapropiadas, mejorando la fiabilidad.

Copy-Paste con conciencia de contexto: La técnica *BIB-Copy-Paste* propuesta por Zhang et al. (2023) para mitigar la pérdida de contexto inherente al pegado aleatorio, se basa en el conocimiento empírico de que los objetos de la misma clase aparecen en escenas similares. El modelo entrena un clasificador para distinguir las características de fondo de los objetos, guiando el pegado a la región de fondo de mayor puntuación, esto asegura la relevancia contextual del objeto pegado. En la Figura 10 muestra el proceso *BIB-Copy-Paste*, dividido en dos partes: la fase de entrenamiento se entrena un clasificador usando una matriz de similitud de fondo y pseudo etiquetas, el objetivo es que este clasificador aprenda a identificar las características del fondo de un objeto, en la fase de pegado el clasificador entrenado analiza una imagen y encuentra la región de fondo más compatible. Luego, un objeto aleatorio se pega en esa ubicación contextualmente adecuada, y se actualizan las anotaciones, generando así un conjunto de datos mejorado.

Fig. 8. Ejemplo general de técnica: A) Mixup, B) Cutout y C) CutMix (Yun et al., 2019).

.

Tabla 5. Modelos generativos y búsqueda automatizada.

Técnica	**Característica**	**Ventajas**	**Desventajas y costo computacional**	**Aplicación clave en personas**
AutoAugment-det	Búsqueda automatizada de políticas óptimas de DA para detección, adaptadas a diferentes escalas de objetos.	Ofrece mejoras significativas de rendimiento.	Costo de búsqueda notoriamente alto.	La búsqueda de políticas óptimas para *AutoAugment-det* requirió 800 días de TPU.
GANs (DC-GAN/RCGAN)	Generación de datos sintéticos de alta calidad, aprovechando la capacidad de las CNN para extracción de características.	Mitiga la escasez de datos. RCGAN mejorado genera imágenes más realistas y fluidas.	Altos requisitos de *hardware* y tiempo de entrenamiento. La implementación de generación 3D puede requerir una arquitectura de doble GPU.	Detección de peatones en condiciones nocturnas o limitadas. Generación de rostros.
Modelos de difusión / *X-Paste*	Usa modelos generativos *text2image* y zero-shot para la adquisición escalable de instancias.	Permite la adquisición de instancias a gran escala para *Copy-Paste*. Importante para categorías atípicas en segmentación de instancias.	Implica un aumento en los requisitos de *hardware* y tiempo de entrenamiento y el costo computacional es alto.	Mejora el *mask* AP significativamente en segmentación de instancias al generar imágenes diversas con diferentes apariencias.

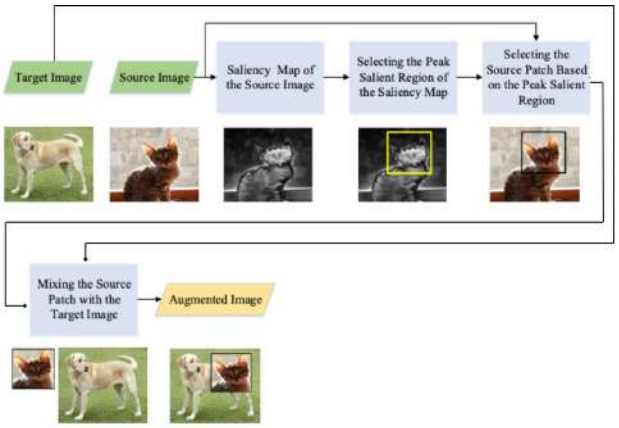


Fig. 9. Proceso de la técnica de DA *SaliencyMix*. Primero, extrae el mapa de saliencia de la imagen original que resalta las regiones de interés, posteriormente, selecciona un parche alrededor de la ubicación del píxel saliente máximo y mezcla con la imagen de destino (Uddin et al., 2021).

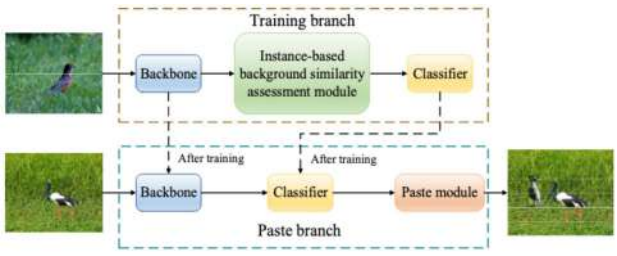


Fig. 10. El proceso de la técnica *BIB-Copy-Paste* (Zhang et al., 2023).

.

La Tabla 6 presenta una comparación de estas estrategias, enfocándose en su capacidad para actuar como regularizadores, su eficiencia, y su enfoque en mitigar la perdida de la plausibilidad contextual en el dominio de personas.

5. ANÁLISIS COMPARATIVO CON REVISIONES EXISTENTES

Para destacar el enfoque diferencial de esta revisión, que enfatiza los aspectos de implementación práctica, en la Tabla 7 se presenta para contrastar esta revisión con otras versiones clave del la literatura.

El enfoque diferencial se resume en cuatro áreas clave:

- **Enfoque de dominio (imágenes de personas):** Esta revisión está focalizada en el análisis profundo del DA para personas, incluyendo desafíos específicos como la detección de personas pequeñas, analizando estrategias adaptativas de *Copy-Paste*.
- **Costo computacional y hardware:** Se focaliza en la viabilidad práctica, cuantificando el alto costo de búsqueda de políticas óptimas de DA (ejemplo: 800 días de TPU para *AutoAugment-det*) y discutiendo los requisitos de hardware para métodos avanzados, como las arquitecturas de doble GPU (*duo-GPU pipeline*) en la generación de escenas 3D.
- **Eficiencia para modelos ligeros:** La revisión prioriza la integración de DA con arquitecturas diseñadas para inferencia rápida y *edge computing*. Analizando específicamente modelos eficientes como EdgeYOLO, YOLO_EC y *RHF-Net*. Se destaca cómo la combinación de DA y la optimización de red puede incrementar la velocidad de detección.
- **Preservación de identidad y contexto:** Aborda los desafíos inherentes al dominio humano. Se focaliza en cómo la distorsión de la forma (ej., por Rotación Local Aleatoria) puede degradar el rendimiento en la segmentación del cuerpo humano. Además, enfatiza la necesidad de preservación contextual en *Copy-Paste*, destacando soluciones sensibles al contexto como *BIB-Copy-Paste* para evitar la perdida de información de fondo crucial.

Tabla 6. Estrategias de copiado, pegado y mezcla.

Técnica	Característica	Ventajas	Desventajas y costo computacional	Impacto en imágenes de personas / eficiencia
Mixup	Interpola linealmente vectores de características y etiquetas de dos imágenes.	Mejora la fiabilidad. Crea ejemplos virtuales de entrenamiento y el costo computacional es bajo.	Requiere un mayor número de épocas para la convergencia.	Estrategia de regularización efectiva.
CutMix	Reemplaza una región rectangular con un parche de otra imagen y mezcla las etiquetas.	Mejora la generalización, la localización y la fiabilidad contra auto generaciones.	Requiere un mayor número de épocas de entrenamiento hasta la convergencia y el costo computacional es bajo.	Superior a Cutout y Mixup en tareas de localización/detección.
Copy-Paste (básico)	Cortar instancias segmentadas y pegarlas en fondos.	Eficiente método para segmentación de instancias, especialmente para categorías atípicas.	Pierde la información contextual y puede crear artefactos de píxeles, el costo computacional es bajo, sin sobrecarga de inferencia.	Pérdida de información contextual crucial para la detección de objetos pequeños (APs).
BIB-Copy-Paste	Pega instancias en regiones de fondo que coinciden con información contextual.	Asegura la plausibilidad contextual del objeto pegado.	Requiere generar pseudo-etiquetas de fondo y entrenar un clasificador para guiar el pegado, el costo computacional es moderado.	Mitiga la perdida de contexto inherente al Copy-Paste aleatorio.
Copy-Paste with Self-Adaptation	Ajusta el número óptimo de instancias a pegar por clase basándose en los resultados de evaluación del modelo inicial y el desequilibrio de clases.	Mejora el desequilibrio de clases de forma auto-adaptativa, buscando la estrategia óptima para el modelo.	La desgaste contextual del Copy-Paste subyacente puede causar una ligera disminución en APs. Costo computacional moderado.	Se puede insertar simplemente en diferentes modelos de detección.
SaliencyMix / SalfMix	Utiliza un mapa de saliencia para seleccionar un parche representativo y mezclarlo con la imagen objetivo.	Logra mejoras de rendimiento con baja sobrecarga computacional. Mejora la fiabilidad.	Introduce un costo computacional adicional debido a la detección de saliencia y el costo computacional es bajo.	Guía la mezcla para evitar la perdida de información clave, mejorando el rendimiento.
You Only Cut Once (YOCO)	Estrategia libre de parámetros y fácil de usar que divide la imagen, aplica DA individualmente a las imágenes y las concatena.	Simplicidad y efectividad; ofrece ganancias de rendimiento moderadas con baja complejidad.	Se enfoca en ser una solución de bajo costo en consumo de *hardware*.	Puede aumentar la diversidad a nivel de regiones locales e imagen holística.

6. CONCLUSIONES

El aumento de datos es una estrategia indispensable para el entrenamiento de modelos de aprendizaje profundo en visión por computadora. Específicamente en el dominio de imágenes de personas, el DA debe ser meticulosa y estratégica, abordando no solo la insuficiencia de datos, sino también las restricciones operacionales y las sensibilidades específicas del objeto.

Se ha identificado que los requerimientos de hardware y los costos computacionales varían ampliamente. Mientras que las técnicas de búsqueda automática como *AutoAugment* son prohibitivamente caras (ej., 800 TPU-days), las alternativas ligeras y sin parámetros como YOCO, o los métodos basados en saliencia como *SalfMix* y *SaliencyMix*, ofrecen un equilibrio favorable entre rendimiento y eficiencia.

La eficiencia en modelos ligeros es una consideración de diseño crítica. La incorporación de arquitecturas ligeras como *EfficientNet-b2* junto al DA adecuado, o el diseño de detectores optimizados para dispositivos embebidos como *EdgeYOLO, RHF-Net*, demuestran que es posible lograr alta precisión y velocidad de inferencia en entornos de recursos limitados.

Finalmente, el desafío de preservar la identidad y la plausibilidad contextual es crucial para el dominio de detección de personas. Las transformaciones que distorsionan la forma como RLR en la segmentación del cuerpo humano pueden ser perjudiciales. La evolución de las técnicas de *Copy-Paste* hacia enfoques sensibles al contexto, como el *BIB-Copy-Paste*, que asegura la coherencia contextual de los objetos pegados, es una dirección prometedora para aumentar la calidad y la utilidad de los conjuntos de datos sintéticos, incluso utilizando modelos generativos a gran escala como *StableDiffusion*.

Tabla 7. Tabla comparativa de revisión de técnicas de aumento de datos.

Revisión	DA enfocado en imágenes de Personas	Requerimientos de hardware / costo	Eficiencia para modelos ligeros	Preservación de identidad/contexto
Shorten and Khoshgoftaar (2019)	Parcial, mención de GANs para rostros/imágenes.	Sí, costo de TTA, resolución de GANs.	No detallado explícitamente.	Sí, con de cambios de etiqueta en transformaciones geométricas.
Tong and Wu (2022)	Sí, enfocado a conjunto de datos *TinyPerson*, *WIDER FACE*, *pedestrians*.	Menciona costo alto (IPG RCNN).	Sí, analiza modelos para dispositivos embebidos: *RHF-Net*.	Sí, enfocado en contexto y escala para objetos pequeños.
Alomar et al. (2023)	Sí, enfocado a conjunto de datos *Supervisely Person*, RLR, M*obileNet/VGG*.	Menciona alto costo de búsqueda (*AutoAugment*).	Sí, evaluado con *MobileNet* y VGG16.	Sí, analiza de la distorsión de forma por RLR en segmentación.
Islam et al. (2024)	No, esta esnfocado en el ámbito médico.	Sí, resaltan desafíos de complejidad y recursos computacionales.	No detallado explícitamente.	Sí, centrado en la generación de datos realistas.
Esta revisión (2025)	Enfocado al análisis profundo en DA para personas, incluyendo *TinyPerson*, *Supervisely*, *Copy-Paste* adaptativo.	Enfocado al análisis de *Trade-offs*, costos de búsqueda 800 TPU-days, arquitecturas multi-GPU.	Enfocado al análisis de *EdgeYOLO*, *YOLO_EC* y *RHF-Net* para inferencia rápida/ *edge computing*.	Enfocado a la distorsión de forma por RLR, necesidad de plausibilidad contextual en *Copy-Paste* (*BIB-Copy-Paste*, CPA).

REFERENCES

Alomar, K., Aysel, H.I., and Cai, X. (2023). Data Augmentation in Classification and Segmentation: A Survey and New Strategies. *Journal of Imaging*, 9(2), 46. doi:10.3390/jimaging9020046. URL https://www.mdpi.com/2313-433X/9/2/46. Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

Chen, W., Zhu, Y., Tian, Z., Zhang, F., and Yao, M. (2023). Occlusion and multi-scale pedestrian detection A review. *Array*, 19, 100318. doi:10.1016/j.array.2023.100318. URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2590005623000437.

Chen, Y., Li, Y., Kong, T., Qi, L., Chu, R., Li, L., and Jia, J. (2021). Scale-aware Automatic Augmentation for Object Detection. In *2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 9558–9567. IEEE, Nashville, TN, USA. doi:10.1109/CVPR46437.2021.00944. URL https://ieeexplore.ieee.org/document/9578269/.

Choi, J., Lee, C., Lee, D., and Jung, H. (2021). SalfMix: A Novel Single Image-Based Data Augmentation Technique Using a Saliency Map. *Sensors*, 21(24), 8444. doi:10.3390/s21248444. URL https://www.mdpi.com/1424-8220/21/24/8444. Number: 24 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

DeVries, T. and Taylor, G.W. (2017). Improved Regularization of Convolutional Neural Networks with Cutout. doi:10.48550/arXiv.1708.04552. URL http://arxiv.org/abs/1708.04552. ArXiv:1708.04552 [cs].

Dwibedi, D., Misra, I., and Hebert, M. (2017). Cut, Paste and Learn: Surprisingly Easy Synthesis for Instance Detection. In *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 1310–1319. IEEE, Venice. doi:10.1109/ICCV.2017.146. URL http://ieeexplore.ieee.org/document/8237408/.

Fan, J., Cui, L., and Fei, S. (2023). Waste Detection System Based on Data Augmentation and YOLO_ec. *Sensors*, 23(7), 3646. doi:10.3390/s23073646. URL https://www.mdpi.com/1424-8220/23/7/3646.

Frid-Adar, M., Diamant, I., Klang, E., Amitai, M., Goldberger, J., and Greenspan, H. (2018). GAN-based synthetic medical image augmentation for increased CNN performance in liver lesion classification. *Neurocomputing*, 321, 321–331. doi:10.1016/j.neucom.2018.09.013. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231218310749.

Ge, Y., Yu, H.X., Zhao, C., Guo, Y., Huang, X., Ren, L., Itti, L., and Wu, J. (2023). 3D Copy-Paste: Physically Plausible Object Insertion for Monocular 3D Detection. doi:10.48550/arXiv.2312.05277. URL http://arxiv.org/abs/2312.05277.

Ghiasi, G., Cui, Y., Srinivas, A., Qian, R., Lin, T.Y., Cubuk, E.D., Le, Q.V., and Zoph, B. (2021). Simple Copy-Paste is a Strong Data Augmentation Method for Instance Segmentation. In *2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2917–2927. IEEE, Nashville, TN, USA. doi:10.1109/CVPR46437.2021.00294. URL https://ieeexplore.ieee.org/document/9578639/.

Gong, C., Wang, D., Li, M., Chandra, V., and Liu, Q. (2021). KeepAugment: A Simple Information-Preserving Data Augmentation Approach. In *2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 1055–1064. IEEE, Nashville, TN, USA. doi:10.1109/CVPR46437.2021.00111. URL https://ieeexplore.ieee.org/document/9578546/.

Han, J., Fang, P., Li, W., Hong, J., Armin, M.A., Reid, I., Petersson, L., and Li, H. (2022). You Only Cut Once: Boosting Data Augmentation with a Single Cut. doi:10.48550/arXiv.2201.12078. URL http://arxiv.org/abs/2201.12078. ArXiv:2201.12078 [cs].

Islam, T., Hafiz, M.S., Jim, J.R., Kabir, M.M., and Mridha, M. (2024). A systematic review of deep learning data augmentation in medical imaging: Recent advances and future research directions. *Healthcare Analytics*, 5, 100340. doi:10.1016/j.health.2024.100340. URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/

pii/S277244252400042X.

Kumar, T., Brennan, R., Mileo, A., and Bendechache, M. (2024). Image Data Augmentation Approaches: A Comprehensive Survey and Future Directions. *IEEE Access*, 12, 187536–187571. doi:10.1109/ACCESS.2024.3470122. URL https://ieeexplore.ieee.org/document/10699340/.

Li, F.F., Andreeto, M., Ranzato, M., and Perona, P. (2022). Caltech 101. doi:10.22002/D1.20086.

Liu, B., Su, S., and Wei, J. (2022). The Effect of Data Augmentation Methods on Pedestrian Object Detection. *Electronics*, 11(19), 3185. doi:10.3390/electronics11193185. URL https://www.mdpi.com/2079-9292/11/19/3185.

Liu, S., Zha, J., Sun, J., Li, Z., and Wang, G. (2023). EdgeYOLO: An Edge-Real-Time Object Detector. doi:10.48550/arXiv.2302.07483. URL http://arxiv.org/abs/2302.07483. ArXiv:2302.07483 [cs].

Radford, A., Metz, L., and Chintala, S. (2016). Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks. doi:10.48550/arXiv.1511.06434. URL http://arxiv.org/abs/1511.06434. ArXiv:1511.06434 [cs].

Shorten, C. and Khoshgoftaar, T.M. (2019). A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning. *Journal of Big Data*, 6(1), 60. doi:10.1186/s40537-019-0197-0. URL https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0.

Supervisely (2018). Supervisely persons dataset. Dataset available on Supervisely website. URL https://supervise.ly. Accessed on 10 November 2025.

Tong, K. and Wu, Y. (2022). Deep learning-based detection from the perspective of small or tiny objects: A survey. *Image and Vision Computing*, 123, 104471. doi:10.1016/j.imavis.2022.104471. URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0262885622001007.

Uddin, A.F.M.S., Monira, M.S., Shin, W., Chung, T., and Bae, S.H. (2021). SaliencyMix: A Saliency Guided Data Augmentation Strategy for Better Regularization. doi:10.48550/arXiv.2006.01791. URL http://arxiv.org/abs/2006.01791. ArXiv:2006.01791 [cs].

Xie, T., Cheng, X., Wang, X., Liu, M., Deng, J., Zhou, T., and Liu, M. (2021). Cut-Thumbnail: A Novel Data Augmentation for Convolutional Neural Network. *Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia*, 1627–1635. doi:10.1145/3474085.3475302. URL https://dl.acm.org/doi/10.1145/3474085.3475302. Conference Name: MM '21: ACM Multimedia Conference ISBN: 9781450386517 Place: Virtual Event China Publisher: ACM.

Yang, X., Man, Y., Chen, J.K., and Wang, Y.X. (2024). SceneCraft: Layout-Guided 3D Scene Generation. doi:10.48550/arXiv.2410.09049. URL http://arxiv.org/abs/2410.09049. ArXiv:2410.09049 [cs] version: 1.

Yu, X., Li, F., Bai, P., Liu, Y., and Chen, Y. (2023). Copy-paste with self-adaptation: A self-adaptive adjustment method based on copy-paste augmentation. *IET Computer Vision*, 17(8), 936–947. doi:10.1049/cvi2.12207.

Yu, X., Gong, Y., Jiang, N., Ye, Q., and Han, Z. (2019). Scale Match for Tiny Person Detection. URL http://arxiv.org/abs/1912.10664. ArXiv:1912.10664 [cs].

Yun, S., Han, D., Chun, S., Oh, S.J., Yoo, Y., and Choe, J. (2019). CutMix: Regularization Strategy to Train Strong Classifiers With Localizable Features. In *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 6022–6031. IEEE, Seoul, Korea (South). doi:10.1109/ICCV.2019.00612. URL https://ieeexplore.ieee.org/document/9008296/.

Zhang, H., Cissé, M., Dauphin, Y., and Lopez-Paz, D. (2017a). mixup: Beyond Empirical Risk Minimization. *ArXiv*. URL https://www.semanticscholar.org/paper/mixup%3A-Beyond-Empirical-Risk-Minimization-Zhang-Ciss%C3%A9/4feef0fd284feb1233399b400eb897f59ec92755.

Zhang, L., Xing, Z., and Wang, X. (2023). Background Instance-Based Copy-Paste Data Augmentation for Object Detection. *Electronics*, 12(18), 3781. doi:10.3390/electronics12183781. URL https://www.mdpi.com/2079-9292/12/18/3781. Number: 18 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

Zhang, S., Benenson, R., and Schiele, B. (2017b). Citypersons: A diverse dataset for pedestrian detection.

Zhao, H., Sheng, D., Bao, J., Chen, D., Dong Chen, Wen, F., Yuan, L., Liu, C., Zhou, W., Chu, Q., Zhang, W., and Yu, N. (2023). X-Paste: Revisiting Scalable Copy-Paste for Instance Segmentation using CLIP and StableDiffusion. In *Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning*, 42098–42109. PMLR. URL https://proceedings.mlr.press/v202/zhao23f.html. ISSN: 2640-3498.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Artificial vision system for drowsiness and distraction detection in high-risk activities

GF Pérez-García * **JA Fragoso-Mandujano** *
SM Márquez-Marina * **KM Velázquez-Nataren** *
JA Orozco-Torres * **AZ Aguilar-Sántiz** *

* *Tecnológico Nacional de México/I.T. de Tuxtla Gutiérrez , Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. (e-mail: gilbert.pg@tuxtla.tecnm.mx).*

Resumen
Drowsiness and distraction are determining factors in the occurrence of accidents during high-risk activities. According to INEGI and SICT, in Mexico, more than 80 % of workplace and road accidents are due to human error associated with both conditions. To address this problem, this work proposes a computer vision system based on artificial intelligence and real-time video processing to detect drowsiness and distraction in high-risk environments. The system implements a low-cost modular architecture comprising a Raspberry Pi 5 and an RGB-D camera to capture color and depth information. Facial coordinate detection is performed using MediaPipe's MeshFace framework, upon which the logic for identifying fatigue and distraction is built. In addition, this vision system includes a management interface. While this work demonstrates its application in driving, the system is adaptable to the operation of industrial machinery, offering a versatile tool to strengthen safety in critical environments.

Keywords: Artificial vision, Drowsiness, Distraction, Artificial intelligence, Industrial safety, Real-time processing, Fatigue detection, Raspberry Pi.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de accidentes laborales y viales asociados con la fatiga y la distracción representa un problema crítico de seguridad en México y en el mundo. De hecho, estadísticas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), indican que más del 80 % de los incidentes en actividades de riesgo se relacionan con errores humanos derivados de la somnolencia o la pérdida de atención. Estos estados reducen la capacidad de reacción, el control motor y la percepción del entorno, generando condiciones propicias para accidentes graves, tanto en la conducción de vehículos como en la operación de maquinaria industrial.

Los métodos tradicionales para prevenir estos eventos suelen basarse en evaluaciones subjetivas o sensores fisiológicos invasivos, los cuales presentan limitaciones de comodidad y costo. En contraste, los sistemas de visión artificial permiten analizar en tiempo real patrones faciales y oculares mediante cámaras de video y técnicas de inteligencia artificial, lo que posibilita la detección temprana de señales de fatiga y distracción de manera no invasiva.

El objetivo de esta investigación es desarrollar un sistema de visión artificial capaz de identificar comportamientos de riesgo asociados con la somnolencia y la distracción durante actividades de alta exigencia, siendo aplicable tanto en la conducción vehicular como en la operación de maquinaria industrial, donde la vigilancia continua del nivel de atención es esencial. Para alcanzar este propósito, se propone un sistema de visión por computadora con una arquitectura modular y de bajo costo, compuesta por una Raspberry Pi 5 y una cámara RGB-D que permite capturar información de color y profundidad en tiempo real. La localización de coordenadas faciales de interés se realiza mediante el framework MeshFace de MediaPipe. Se desarrolló toda la lógica de detección y operación que determina si el operario presenta signos de bostezo, microsueño o distracción visual. Ante la detección de cualquiera de estos estados, el sistema local se comunica con una interfaz de administración que permite la supervisión remota del estado del operario.

La relevancia de este trabajo radica en desarrollar herramientas preventivas accesibles y no invasivas que permitan intervención inmediata frente a condiciones de riesgo. La propuesta es aplicable tanto en la conducción vehicular como en la operación de maquinaria industrial donde la vigilancia continua del nivel de atención es esencial para la seguridad. Entre sus principales aportes, destaca el diseño modular de bajo costo, junto con el desarrollo de algoritmos optimizados para hardware embebido. Además, se incluye una evaluación experimental que valida su desempeño en escenarios reales.

2. ESTADO DEL ARTE

El análisis no intrusivo de somnolencia y distracción en actividades de riesgo se ha basado tradicionalmente en indicadores comportamentales derivados de la observación ocular y facial. Entre estos indicadores se destacan PER-

⋆ Sponsor and financial support acknowledgment goes here. Paper titles should be written in uppercase and lowercase letters, not all uppercase.

CLOS (porcentaje de tiempo con el párpado cerrado), la tasa y duración del parpadeo, y métricas relacionadas con la orientación y velocidad angular de la cabeza. PERCLOS, definido y validado en la década de 1990 como un índice robusto frente a la privación de sueño, sigue siendo una referencia operativa en muchos sistemas comerciales y de investigación (Wierwille and Ellsworth, 1994; Trutschel, 2018). Sin embargo, su estimación fiable en condiciones reales requiere metodologías que puedan manejar oclusiones parciales, variaciones de iluminación y cambios posturales.

Los primeros sistemas implementaron detección de rostro y regiones oculares con métodos clásicos (Haar cascades, HOG+SVM) y reglas heurísticas para computar umbrales de alarma; estas aproximaciones son eficientes y adecuadas para prototipos de bajo coste, pero muestran sensibilidad a condiciones adversas (iluminación, oclusiones, uso de gafas). La evolución hacia modelos basados en aprendizaje profundo permitió mejorar la detección de cierre ocular, bostezos y cabeceos mediante redes convolucionales (CNN) y modelos temporales que capturan la dinámica de secuencias de vídeo. Revisiones recientes sintetizan el avance desde heurísticas hacia arquitecturas DL y resaltan retos de robustez y generalización. (Albadawi et al., 2022).

La disponibilidad de frameworks de estimación facial en tiempo real, como MediaPipe (face mesh), facilitó la extracción estable de landmarks faciales y la implementación de pipelines ligeros para calcular indicadores como PERCLOS, Eye Aspect Ratio (EAR) y Head Pose. MediaPipe ofrece utilidades para implementar cadenas de percepción con baja latencia en múltiples plataformas, lo que ha impulsado trabajos que utilizan Face Mesh para detección de somnolencia y para cálculo de MAR/EAR en tiempo real sobre hardware limitado. (Lugaresi et al., 2019).

En el ámbito de la conducción, conjuntos de datos especializados (por ejemplo, YawDD) y estudios de campo han sido determinantes para entrenar y evaluar modelos de detección de bostezos y cierre ocular en condiciones reales; además, trabajos recientes exploran arquitecturas modernas (CNN ligeras, transformers adaptados) y pipelines temporales para mejorar sensibilidad y disminuir falsos positivos en escenarios de tráfico real. (Abtahi et al., 2014).

La fusión multimodal, combinando señales visuales (RGB y profundidad) con variables fisiológicas (por ejemplo, PPG/HRV) o con parámetros del vehículo/maquinaria, ha mostrado ventajas claras: reduce la tasa de falsas alarmas y aumenta la detección temprana al explotar correlaciones entre la degradación cognitiva y respuestas autonómicas. Este enfoque híbrido es especialmente relevante cuando la cámara por sí sola resulta insuficiente por condiciones ambientales adversas. (Saleem et al., 2022).

Para aplicaciones industriales de alto riesgo existen despliegues comerciales y estudios aplicados que demuestran impacto operacional. Tecnologías de seguimiento ocular y facial desarrolladas por la industria (Seeing Machines), y su adopción por fabricantes como Caterpillar, ilustran la viabilidad y el valor de sistemas de monitorización de fatiga en sectores como minería y construcción, con reportes de reducción significativa de "fatigue events" tras su implementación. Estos sistemas suelen integrar cámaras infrarrojas, algoritmos de tracking y lógica de alertas en cabina y en centros de control. (Lenné et al., 2019).

Este trabajo se centra en el desarrollo de algoritmos que capturan la dinámica temporal de conductas de riesgo, como cierres oculares y desviaciones de la mirada. La arquitectura se ha diseñado para optimizar el rendimiento en hardware embebido mediante poda, cuantización y conversión a formatos de ejecución en edge. Un pipeline modular facilita la actualización de modelos y la calibración en campo. La evaluación se basa en métricas de rendimiento y latencia en pruebas reales. Además, la solución propuesta incluye interfaz local y remota.

3. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

En la Figura 1 se presenta la metodología empleada para el desarrollo de la investigación.

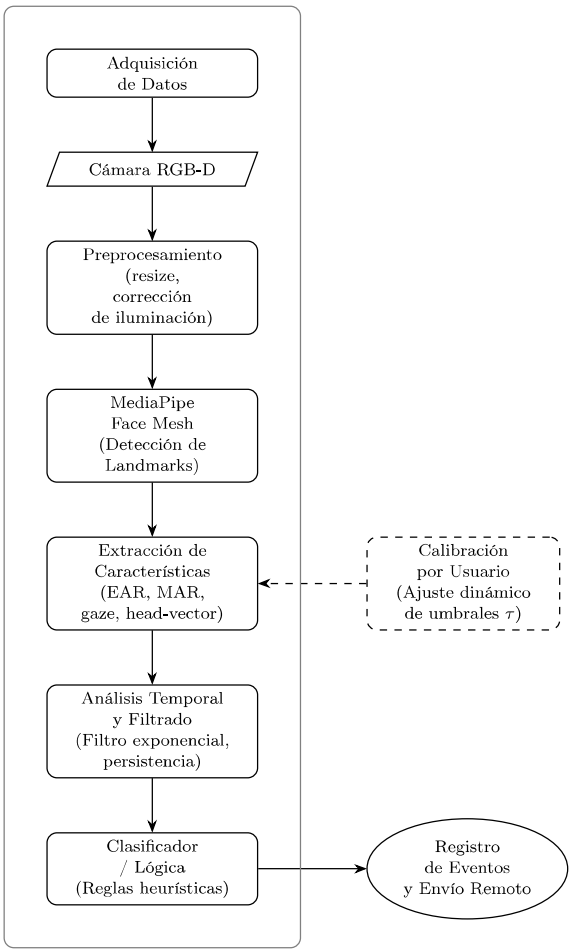


Figura 1. Diagrama metodológico general.

El proceso para el análisis conductual comienza con la adquisición de datos, utilizando cámaras RGB-D que proporciona información de color y profundidad. Esta captura es preprocesada, con correcciones de redimensionamiento, iluminación, eliminación de ruido y recorte de la región de interés facial.

Posteriormente, la imagen ya preprocesada se analiza mediante el framework MediaPipe Face Mesh, que identifica

los puntos clave del rostro o landmarks (coordenadas faciales) para el análisis. Una vez obtenida la información de las coordenadas, se procede a la interpretación de los datos faciales. En esta etapa, la extracción de características calcula métricas críticas como la relación de aspecto del ojo (EAR) y de la boca (MAR), la orientación de la cabeza (head-vector) y la dirección de la mirada (gaze), todos ellos indicadores directos de los estados de somnolencia y distracción del individuo.

Con esta información, el algoritmo de clasificación combina reglas heurísticas para determinar si la combinación de estas métricas constituye un estado de riesgo (bostezo, microsueño o distracción visual). Esta información alimenta al módulo de registro de eventos y envío remoto, que funciona como un respaldo de datos para la supervisión externa y el análisis post-incidente. Una función fundamental en la robustez del sistema es la calibración por usuario, permitiendo el ajuste dinámico de los umbrales de detección (τ) para personalizar la sensibilidad del sistema a las características fisiológicas únicas de cada operario, garantizando así la máxima efectividad en escenarios operativos reales.

El sistema implementado en este trabajo se basa en una lógica determinística de umbrales y fusión temporal sobre landmarks proporcionados por MediaPipe Face Mesh. Aunque se considera la posibilidad de integrar modelos aprendidos ligeros, en la presente versión se priorizó una solución heurística por las siguientes razones: (i) el objetivo práctico de obtener una herramienta embebida de baja latencia y determinista, (ii) la necesidad de una calibración por usuario sencilla en campo, y (iii) la heterogeneidad y limitada disponibilidad de anotaciones temporales compatibles con nuestro protocolo, que dificultan comparaciones directas reproducibles con baselines publicados. La reejecución de baselines aprendidos sobre exactamente el mismo protocolo (LOSO y definiciones de eventos) se deja como trabajo futuro inmediato para comparar empíricamente Event-F1, FP/h y TTD.

3.1 Diseño de la arquitectura del sistema

En la Figura 2 se muestra el sistema completo propuesto, centrado en una cámara RGB-D, seleccionada por su capacidad de capturar de forma simultánea imágenes a color y mapas de profundidad; esta dualidad aporta información tridimensional que mejora la robustez de la estimación de rasgos faciales, la detección de parpadeos, la cuantificación de movimientos de cabeza y la estimación de la dirección de la mirada, incluso bajo condiciones de iluminación variable. La cámara empleada proporciona una resolución de 1280×720 píxeles en RGB y 640×480 en profundidad, opera a 30 fotogramas por segundo, cubre un rango operativo aproximado de 0.2 a 25 m y se conecta mediante USB 3.0.

La etapa de cómputo está centrada en una unidad embebida Raspberry Pi 5. Esta plataforma incorpora un procesador Broadcom BCM2712 (Arm Cortex-A76, cuatro núcleos a 2.4 GHz), GPU VideoCore VII y configuraciones de memoria de 4 u 8 GB, lo cual permite ejecutar de forma fluida los modelos de visión y los pipelines de procesamiento desarrollados sin sacrificar el consumo en entornos embebidos.

Figura 2. Sistema completo propuesto.

La gestión y visualización remota se realiza mediante una interfaz desarrollada en Flask (backend en Python) con front-end en HTML/CSS, que permite a administradores supervisar operarios en tiempo real, recibir notificaciones y consultar historiales de eventos.

3.2 Teoría implementada para la detección de somnolencia, distracción y bostezos

Las coordenadas faciales para el desarrollo de los algoritmos de identificación de eventos se basan en el uso del framework MeshFace de MediaPipe, una biblioteca de código abierto desarrollada por Google que proporciona detección precisa de diferentes puntos del rostro.

Este framework permite la identificación de alrededor de 468 puntos de la cara, incluyendo puntos de interés como la forma de los ojos, la posición de las cejas, la nariz, la boca y la silueta del rostro. En la Figura 3 se muestra el mallado realizado por el framework, que proporciona una representación detallada de las coordenadas faciales. El mallado facial se compone de una red de puntos y triángulos que se ajustan a la forma del rostro, lo que permite una detección precisa de los movimientos y expresiones faciales.

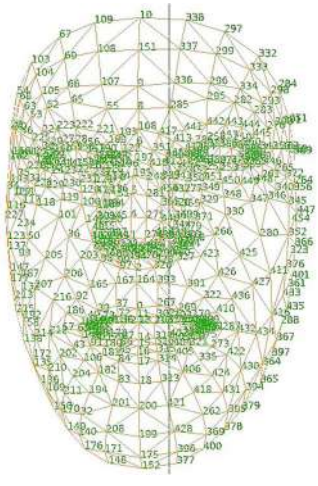


Figura 3. Coordenadas faciales extraídas con MeshFace de MediaPipe

La detección de cierres oculares y parpadeos se basa en el *Eye Aspect Ratio* (EAR), una métrica geométrica derivada de seis *landmarks* faciales que describen el contorno del

ojo. El EAR se define en la ecuación (1) como la razón entre la distancia vertical promedio y la distancia horizontal del ojo:

$$\mathrm{EAR}(t) \;=\; \frac{\|p_2(t)-p_6(t)\|+\|p_3(t)-p_5(t)\|}{2\,\|p_1(t)-p_4(t)\|}. \quad (1)$$

donde $p_i(t)$ representan las coordenadas bidimensionales de los puntos faciales que delimitan el ojo, de acuerdo con el *mesh* facial proporcionado por MediaPipe. Durante un parpadeo, el valor de $\mathrm{EAR}(t)$ disminuye bruscamente, y en estados de somnolencia prolongada permanece sostenidamente por debajo de un umbral τ_{EAR}.

A partir de esta métrica se define el indicador *PERCLOS* (Percentage of Eye Closure), que mide el porcentaje de tiempo en que los ojos permanecen cerrados dentro de una ventana temporal discreta T, según la ecuación (2):

$$\mathrm{PERCLOS}_T \;=\; \frac{1}{|T|}\sum_{t\in T}\mathbf{1}\{\mathrm{EAR}(t)<\tau_{\mathrm{EAR}}\}\times 100\,\%. \quad (2)$$

Esta expresión es una función indicadora que toma el valor 1 cuando la condición $\mathrm{EAR}(t)<\tau_{\mathrm{EAR}}$ se cumple, y 0 en caso contrario. De esta forma, $\mathrm{PERCLOS}_T$ cuantifica la proporción de tiempo en que los párpados permanecen cerrados, siendo un indicador robusto del nivel de fatiga visual y somnolencia del operador.

El movimiento de cabeceo se cuantifica mediante la distancia euclidiana entre los *landmarks* de la nariz y la barbilla, como se muestra en la ecuación (3):

$$\mathrm{cabeceo}_t \;=\; \sqrt{\big(x_{\mathrm{chin}}(t)-x_{\mathrm{nose}}(t)\big)^2+\big(y_{\mathrm{chin}}(t)-y_{\mathrm{nose}}(t)\big)^2}, \quad (3)$$

donde $(x_{\mathrm{nose}}(t), y_{\mathrm{nose}}(t))$ y $(x_{\mathrm{chin}}(t), y_{\mathrm{chin}}(t))$ representan las coordenadas bidimensionales del landmark de la nariz y la barbilla en el fotograma t (componente horizontal x y vertical y, en unidades de píxeles o normalizadas en $[0,1]$). Aquí t indica el *frame index* o instante de muestreo.

La dinámica angular del movimiento de cabeza se analiza a partir de la variación temporal del vector definido entre estos puntos, calculando la velocidad angular entre instantes consecutivos mediante la ecuación (4):

$$\omega_t \;=\; \frac{\cos^{-1}\!\left(\dfrac{v_t\cdot v_{t-1}}{\|v_t\|\,\|v_{t-1}\|}\right)}{\Delta t}, \quad v_t=\begin{bmatrix}x_{\mathrm{chin}}(t)-x_{\mathrm{nose}}(t)\\ y_{\mathrm{chin}}(t)-y_{\mathrm{nose}}(t)\end{bmatrix}. \quad (4)$$

Aquí, v_t es el vector cabeza en el instante t, y Δt corresponde al intervalo de muestreo entre fotogramas (en segundos). Un aumento sostenido en $\mathrm{cabeceo}_t$ acompañado de picos en ω_t es indicativo de un posible evento de microsueño.

Para reducir la sensibilidad al ruido y evitar falsas detecciones, las señales se suavizan mediante un filtro exponencial y se aplican criterios de persistencia temporal, exigiendo una duración mínima de $\Delta t_{\mathrm{mín}}$ para validar el evento.

La detección de bostezos se basa en el *Mouth Aspect Ratio* (MAR - Ecuación (5)), calculado a partir de landmarks bucales como

$$\mathrm{MAR}(t) \;=\; \frac{1}{3\,\|m_1(t)-m_5(t)\|}\left(\|m_2(t)-m_8(t)\| +\|m_3(t)-m_7(t)\|+\|m_4(t)-m_6(t)\|\right), \quad (5)$$

En la Ec. 5, cada $m_i(t)$ corresponde al landmark i del contorno bucal devuelto por MediaPipe; la correspondencia exacta de los $m_1 \dots m_8$ con los landmark IDs empleados aparece en la Tabla 2.

La dirección de la mirada se obtiene mediante

$$\mathrm{direccion_mirada} = \tan^{-1}\left(\frac{y_{\mathrm{ojo_izq}}-y_{\mathrm{ojo_der}}}{x_{\mathrm{ojo_izq}}-x_{\mathrm{ojo_der}}}\right) \quad (6)$$

y la desviación angular respecto al eje frontal se evalúa en ventanas temporales para detectar distracción visual persistente.

3.3 Lógica del pseudocódigo implementado

En la Tabla 1 se muestra el pseudocódigo resumido por pasos.

Tabla 1. Pseudocódigo desarrollado por cada frame

Paso	Acción / Lógica Condicional	Referencia
1	Obtener la Relación de Aspecto del Ojo (EAR(t)) a partir de L_t.	Ec. 1
2	Obtener la Relación de Aspecto de la Boca (MAR(t)) a partir de L_t.	Ec. 5
3	Calcular el vector de orientación de la cabeza v_t y la velocidad angular ω_t.	Ec. 4
Detección de Somnolencia (EAR)		
4	**SI** $\mathrm{EAR}(t)<\tau_{EAR}$: incrementar contador de ojos_cerrados.	Persistencia
5	**SINO**: reiniciar contador de ojos_cerrados.	-
Detección de Bostezo (MAR)		
6	**SI** $\mathrm{MAR}(t)>\tau_{MAR}$ y duración $>\Delta t_{\mathrm{mín}}$: marcar evento_bostezo.	Persistencia
Detección de Distracción / Microsueño (Cabeceo)		
7	**SI** ω_t supera umbral y el cabeceo aumenta sostenidamente: marcar evento_microsueño.	Lógica v_t
Emisión de Evento (Decisión Crítica)		
8	**SI** la combinación de métricas (contadores y eventos) cumple la regla crítica: emitir y registrar evento.	Regla crítica

El sistema emite un evento cuando se cumple al menos una de las siguientes condiciones (evaluadas en tiempo real):

1. $\mathrm{PERCLOS}_{60\ \mathrm{s}} > \kappa_{PERCLOS}$ y contador_ojos_cerrados $> N_{\mathrm{frames}}$.

2. $\mathrm{MAR}(t) > \tau_{\mathrm{MAR}}$ durante $> \Delta t_{\mín}$.
3. $\omega_t > \tau_\omega$ y $\mathrm{EAR}(t) < \tau_{\mathrm{EAR}}$ durante $> \Delta t_{\mín}$.

Los umbrales iniciales se obtuvieron por búsqueda de rejilla sobre los sujetos de entrenamiento (folds LOSO): $\tau_{\mathrm{EAR}} \in [0.15, 0.28]$ paso 0.01, $\tau_{\mathrm{MAR}} \in [0.4, 0.8]$ paso 0.05, y $\Delta t_{\mín} \in [0.4, 1.2]$ s paso 0.1.

Para cada configuración se optimizó el Event-F1 sobre los sujetos de entrenamiento; la configuración final se seleccionó maximizando Event-F1 bajo la restricción FP/h ≤ 1.2. El filtrado exponencial aplicado a cada señal s_t usa la actualización $\tilde{s}_t = \alpha s_t + (1-\alpha)\tilde{s}_{t-1}$ con $\alpha = 0.35$, seleccionado empíricamente por su compromiso latencia/ruido. PERCLOS se calcula sobre ventanas de $T = 60$ s (desplazamiento 1 s), y el contador ojos_cerrados requiere un umbral de frames equivalente a $\Delta t_{\mín}$.

Por cada fotograma I_t se extraen los *landmarks* L_t suministrados por MediaPipe Face Mesh; estos puntos normalizados permiten calcular de forma directa las métricas geométricas (*Eye Aspect Ratio* — EAR, *Mouth Aspect Ratio* — MAR y el vector de orientación de cabeza o *head-vector*) sin necesidad de segmentaciones manuales. A partir de L_t se obtiene, en cada instante, la señal $\mathrm{EAR}(t)$ (ecuación 1), la señal $\mathrm{MAR}(t)$ (ecuación 5) y el vector cabeza v_t, a partir del cual se calcula la velocidad angular ω_t (ecuación 4). Estas series temporales describen el estado instantáneo del operario y constituyen la entrada principal al módulo de decisión.

La detección temporal se basa en la aplicación de umbrales iniciales τ_{EAR} y τ_{MAR} sobre las señales previamente filtradas. En particular, cuando $\mathrm{EAR}(t) < \tau_{\mathrm{EAR}}$ se incrementa un contador de *ojos cerrados*; si dicho contador supera el número de fotogramas equivalente a la duración mínima $\Delta t_{\mín}$, se declara un evento de somnolencia parcial. De forma análoga, un valor sostenido de $\mathrm{MAR}(t) > \tau_{\mathrm{MAR}}$ durante más de $\Delta t_{\mín}$ se interpreta como un bostezo. Para eventos más complejos, como el microsueño, la decisión se robustece mediante la combinación de evidencias: un incremento sostenido en cabeceo$_t$ y picos en ω_t, acompañados de una disminución mantenida en EAR o un aumento en MAR, constituyen una señal suficiente para activar la detección. Esta fusión de métricas reduce los falsos positivos provocados por gestos transitorios (por ejemplo, hablar o movimientos faciales aislados).

Antes de la evaluación de umbrales, todas las señales se someten a un filtrado exponencial causal que atenúa el ruido y el *jitter* en la estimación de *landmarks*. Además, se implementa una política de persistencia temporal —basada en ventanas y una duración mínima $\Delta t_{\mín}$— para evitar activaciones debidas a eventos breves. Finalmente, cuando se cumplen simultáneamente las condiciones de umbral, persistencia y evidencia cruzada, el sistema registra el evento junto con su *timestamp* y los valores asociados de las métricas (EAR, MAR, ω, PERCLOS). Este registro posibilita el análisis posterior y el ajuste adaptativo de umbrales para cada usuario.

Los índices listados en la Tabla 2 corresponden a los puntos faciales utilizados. En el caso del *Eye Aspect Ratio* (EAR), se escogieron dos pares de puntos verticales (P2–P6 y P3–P5) y un par horizontal (P1–P4) que, de acuerdo con el mapeo oficial de MediaPipe, representan los párpados superior e inferior y las comisuras del ojo, respectivamente. Esta configuración permite calcular la relación entre la apertura vertical y la longitud horizontal del ojo con alta estabilidad frente a rotaciones moderadas del rostro. Los índices seleccionados se aplicaron tanto al ojo derecho como al izquierdo, y posteriormente se promedió el valor de EAR obtenido en ambos para generar una única señal representativa por fotograma.

Tabla 2. Índices de MediaPipe para el cálculo de EAR y MAR.

Elemento	Landmark(s)	Notas
Ojo derecho (Right Eye) — P1..P6	[33, 160, 158, 133, 153, 144]	P1..P6 en el orden usado en Ec. 1 (puntos del párpado).
Ojo izquierdo (Left Eye) — P1..P6	[362, 385, 387, 263, 373, 380]	Análogo al ojo derecho (se promedia EAR de ambos ojos).
Boca (MAR) — M1..M8	[81, 178, 13, 14, 311, 402, 78, 308]	Selección típica para MAR (verticales y horizontales internas).

En cuanto al *Mouth Aspect Ratio* (MAR), utilizado para la detección de bostezos, se seleccionó un conjunto de ocho puntos que delimitan tanto el contorno interno como el externo de los labios, incluyendo las esquinas laterales de la boca (M1–M8). Esta estructura geométrica permite calcular la apertura vertical media de la boca con respecto a su anchura horizontal, conforme a la definición utilizada en la ecuación 5.

En la implementación práctica, los índices se almacenan en el código fuente del sistema como constantes y se indexan directamente sobre la lista de *landmarks* devuelta por MediaPipe para extraer las coordenadas (x, y) utilizadas en las ecuaciones correspondientes.

3.4 Evaluación y métricas

La evaluación del sistema se organiza en dos niveles complementarios: *frame-level* (por fotograma) y *event-level* (detección de episodios temporales como bostezos o microsueños). El objetivo es medir tanto la capacidad de clasificación instantánea como la capacidad para detectar episodios temporales relevantes en condiciones reales.

En el caso de Frame-level, por fotograma t se dispone de una etiqueta de referencia y_t y una predicción $\hat{y}_t$. A partir de los conteos elementales TP, FP y FN se definen las métricas clásicas:

$$\mathrm{Precision} = \frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP}+\mathrm{FP}}, \qquad \mathrm{Recall} = \frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP}+\mathrm{FN}}, \tag{7}$$

$$\mathrm{F1} = \frac{2 \cdot \mathrm{Precision} \cdot \mathrm{Recall}}{\mathrm{Precision} + \mathrm{Recall}}. \tag{8}$$

Las métricas se reportan por clase (one-vs-rest). Cuando el detector produce puntuaciones continuas por fotograma (por ejemplo $\mathrm{MAR}(t)$ o $1 - \mathrm{EAR}(t)$), se trazan curvas Precision–Recall y se reporta el área bajo la curva PR (AUPR), más informativa en escenarios con fuerte desbalance entre frames normales y frames de evento.

En el caso de Frame-level, los eventos anotados se representan como intervalos (s_i^{GT}, e_i^{GT}) y las predicciones como (s_j^P, e_j^P). Para contabilizar TP, FP y FN a nivel de evento se emplea un emparejamiento uno-a-uno entre anotaciones y predicciones usando una de las siguientes reglas (especificar en el protocolo experimental cuál se eligió):

- **Tolerancia temporal:** una predicción empareja una anotación si la diferencia entre inicios (o entre inicios/fines) es $\leq \Delta_w$ (por defecto $\Delta_w = 1$ s).
- **IoU temporal:** se considera emparejamiento si $\text{IoU}_{\text{temporal}} = \dfrac{\text{overlap}}{\text{union}} \geq \theta$ para un umbral θ prefijado.

A partir del emparejamiento se calculan *Event-Precision*, *Event-Recall* y *Event-F1*. En este trabajo Event-F1 se utiliza como la métrica principal de comparación porque evalúa la detección de intervalos completos y no se ve sesgada por el desbalance de frames.

Los umbrales del sistema (p. ej. $\tau_{\text{EAR}}, \tau_{\text{MAR}}, \tau_\omega, \Delta t_{\text{mín}}$) se optimizaron mediante validación *leave-one-subject-out* (LOSO): para cada sujeto dejado fuera, los umbrales se ajustaron en los sujetos restantes con el objetivo de maximizar Event-F1 manteniendo FP/h en un rango operativo aceptable. Las métricas finales se calculan como la media ± desviación estándar sobre los folds LOSO.

Dado que el sistema implementa reglas determinísticas sobre landmarks (MediaPipe), las métricas de F1 y AUPR se usan aquí para cuantificar la concordancia entre la lógica implementada y las etiquetas humanas (no como indicadores de entrenamiento). Para comparar con métodos basados en aprendizaje automático se recomienda, primero, re-ejecutar baselines relevantes bajo el mismo protocolo LOSO y las mismas reglas de emparejamiento. En segundo lugar, se debe reportar Event-F1, FP/h, TTD y latencia computacional (ms/frame en Raspberry Pi 5). Finalmente, es importante incluir pruebas estadísticas (por ejemplo bootstrap) para evaluar diferencias significativas entre métodos.

4. RESULTADOS

La propuesta presentada utiliza MediaPipe Face Mesh como extractor de *landmarks* y una lógica determinística basada en umbrales y fusión temporal optimizada mediante validación *leave-one-subject-out* (LOSO). Las decisiones del sistema se evalúan principalmente a nivel de evento (*event-level*), por lo que los resultados dependen del protocolo de anotación (definición de inicio/fin de evento, tolerancia temporal y cadencia de muestreo). Como trabajo futuro se propone la reproducción cruzada en datasets públicos y la re-ejecución de baselines bajo el mismo protocolo para una comparación homogénea.

Los umbrales finales empleados fueron $\tau_{\text{EAR}} = 0.21$, $\tau_{\text{MAR}} = 0.60$ y $\Delta t_{\text{mín}} = 0.8$ s; el umbral angular para la velocidad de cabeza τ_ω se optimizó mediante LOSO y quedó calibrado por sujeto. Estos valores se usaron como punto de partida y, cuando fue necesario, se ajustaron durante la fase de calibración por usuario.

4.1 Evaluación Frame-Level

En la Tabla 3 se presentan las métricas calculadas por fotograma (N=12). El sistema muestra alta precisión en la identificación de frames normales y desempeño sólido en las clases de interés (parpadeo, ojos cerrados, bostezo y distracción). Las AUPR elevadas para EAR y MAR indican que las puntuaciones continuas tienen buen poder discriminante cuando se varía el umbral, mientras que las F1 por clase reflejan el equilibrio entre precisión y sensibilidad alcanzado por la lógica basada en *landmarks*.

Tabla 3. Resultados frame-level ($N = 12$).

Clase	Precision	Recall	F1-score	AUPR
Normal	0.95 ± 0.02	0.97 ± 0.01	0.96 ± 0.01	0.99 ± 0.01
Parpadeo (blink)	0.88 ± 0.04	0.85 ± 0.05	0.86 ± 0.04	0.90 ± 0.03
Ojos cerrados (somnol.)	0.86 ± 0.06	0.82 ± 0.07	0.84 ± 0.06	0.88 ± 0.05
Bostezo (yawn)	0.83 ± 0.06	0.78 ± 0.08	0.80 ± 0.07	0.88 ± 0.05
Distracción visual	0.80 ± 0.07	0.76 ± 0.08	0.78 ± 0.07	0.85 ± 0.06

4.2 Evaluación Event-Level

Los resultados a nivel de evento están en la Tabla 4. La métrica principal de comparación es *Event-F1*, que en este estudio alcanzó valores alrededor de 0.82–0.84 para los eventos críticos evaluados; los tiempos medios de detección (TTD) son inferiores a 1 s y la tasa operativa de falsos positivos se sitúa cerca de 0.9 FP/h, valores compatibles con requisitos operativos para alertas tempranas en escenarios controlados.

Tabla 4. Resultados event-level ($N = 12$).

Evento	Event-Precision	Event-Recall	Event-F1	Mean TTD (s)	FP/h
Bostezo (yawn)	0.86 ± 0.05	0.82 ± 0.06	0.84 ± 0.05	0.60 ± 0.20	0.9 ± 0.4
Microsueño	0.84 ± 0.06	0.80 ± 0.07	0.82 ± 0.07	0.90 ± 0.30	0.9 ± 0.4

4.3 Interfaz local

La interfaz local presenta en tiempo real el estado de alerta del operario, superponiendo los *landmarks* detectados y las señales temporales (EAR, MAR, vector cabeza) que alimentan la lógica de decisión. La Figura 4 muestra un episodio simulado de somnolencia con la señal EAR que evidencia persistencia en el cierre ocular; la Figura 5 es una captura en ejecución real donde la combinación de PERCLOS y el contador de ojos cerrados conduce a la activación del evento; la Figura 6 ilustra una distracción visual prolongada (desviación de la mirada >2 s) y la Figura 7 muestra la detección de un bostezo basada en MAR y su persistencia temporal. En las visualizaciones aparecen puntos y líneas que facilitan la interpretación del evento por parte del operador o del supervisor.

4.4 Interfaz de administración

La interfaz de administración centraliza las notificaciones y los historiales de eventos por operario, facilitando la supervisión remota, la generación de reportes y la identificación de patrones de riesgo. La plataforma permite consultar eventos con su *timestamp* y las métricas asociadas (EAR, MAR, PERCLOS, ω), lo que apoya programas de capacitación y políticas de intervención graduada en entornos de flota o plantas industriales (Figuras 8 y 9).

Figura 4. Evento somnolencia durante una simulación

Figura 5. Evento somnolencia en ejecución

Figura 6. Evento distracción en ejecución

5. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta el diseño, la implementación y la evaluación experimental de un sistema de visión artificial orientado a la detección de somnolencia y distracción en actividades de alto riesgo. La solución propuesta combina

Figura 7. Evento bostezo en ejecución

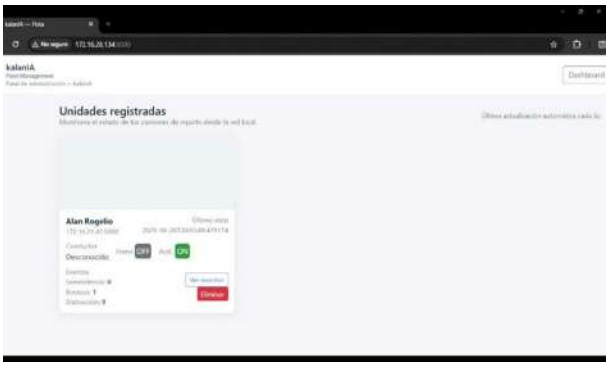


Figura 8. Interfaz de administración

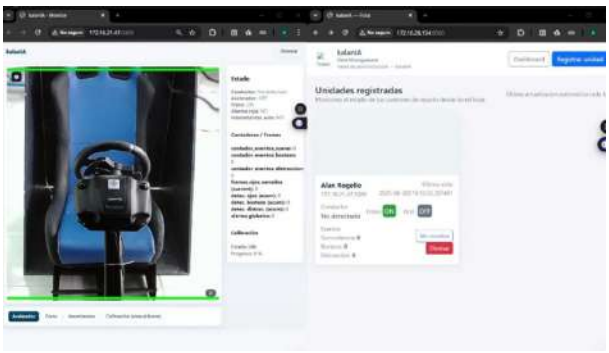


Figura 9. Interfaz de administración en simulación

extracción de *landmarks* con MediaPipe Face Mesh y una lógica determinística de umbrales y fusión temporal optimizada mediante validación *leave-one-subject-out* (LOSO). Las pruebas controladas realizadas en un entorno de conducción muestran que el prototipo identifica correctamente indicadores conductuales relevantes (cierres oculares prolongados, aumento de la duración del parpadeo, bostezos y variaciones significativas en la orientación de la cabeza) con métricas operativas (Event-F1, FP/h, TTD)

adecuadas para sistemas de alerta temprana en escenarios controlados.

La evaluación de los algoritmos evidenciaron limitaciones importantes: degradación del desempeño frente a variaciones lumínicas, oclusiones parciales y usuarios con gafas, así como la presencia de falsos positivos y negativos que podrían afectar la operatividad en despliegues reales. Estas limitaciones se deben tanto a la naturaleza monocular de las señales visuales como a la dependencia de umbrales fijos frente a la variabilidad interindividual y ambiental. Para abordar estas limitaciones proponemos como líneas de trabajo prioritarias la incorporación de umbrales adaptativos y mecanismos de calibración en campo por usuario, la fusión multimodal cuando sea posible (p. ej. profundidad, telemetría de vehículo o señales fisiológicas) y la re-ejecución de baselines publicados bajo el mismo protocolo de anotación (LOSO y definición de evento) para permitir comparaciones empíricas justas en Event-F1 y FP/h. Asimismo, es necesario ampliar la evaluación mediante reproducción cruzada en conjuntos públicos y pruebas de campo en condiciones operativas reales para cuantificar robustez y generalización.

En resumen, el prototipo demuestra que un enfoque de bajo coste basado en MediaPipe y reglas temporales es efectivo en escenarios controlados y constituye una base práctica para soluciones embebidas; sin embargo, su despliegue masivo requiere trabajos adicionales sobre adaptabilidad, robustez frente a condiciones adversas y evaluación comparativa uniforme con métodos de referencia, tareas que hemos programado como pasos inmediatos para consolidar los resultados y facilitar la transferencia tecnológica.

REFERENCIAS

Abtahi, S., Omidyeganeh, M., Shirmohammadi, S., and Hariri, B. (2014). Yawdd: A yawning detection dataset.

Albadawi, Y. et al. (2022). A review of recent developments in driver drowsiness detection. *Sensors*.

Lenné, M.G. et al. (2019). Field study: real-time feedback and reduction of fatigue events using operator monitoring. *Transportation Research / ITS (report)*. Informe / estudio aplicado sobre despliegues comerciales (Seeing Machines) en entornos industriales.

Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., Zhang, F., Chang, C.L., Yong, M.G., Lee, J., Chang, W.T., Hua, W., Georg, M., and Grundmann, M. (2019). Mediapipe: A framework for building perception pipelines. *arXiv preprint*.

Saleem, A.A. et al. (2022). A systematic review on physiological signals based driver drowsiness detection. *Sensors*.

Trutschel, U. (2018). Perclos: An alertness measure of the past. *Driving Research*. Artículo de difusión / revisión sobre el uso operativo de PERCLOS.

Wierwille, W.W. and Ellsworth, L.A. (1994). Perclos: A valid psychophysiological measure of alertness. Technical report, US Department of Transportation / NHTSA.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Genetic Algorithm to Maximize the Strength of Microalloyed Steel

Juárez-Chávez, Jazmín Yanel[1,2], Martínez-Bahena, Beatriz[2], Enríquez-Urbano, Juana[2]

[1]*Facultad de Contaduría, Administración e Informática*

[2]*Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería*

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad No. 1001, Chamilpa, 62210, Cuernavaca, Morelos

(e-mail: jazmin@uaem.mx; bmartinezb@uaem.mx; juana.enriquez@uaem.mx)

Abstract: This article presents a genetic algorithm (GA) to maximize the mechanical strength of a microalloyed steel. The chemical elements that contribute to the material's strength are selected, and the limits (lower and upper) for the percentage chemical composition are defined. To properly apply the algorithm, extensive research was conducted on its use in the materials field. This allowed the definition of an appropriate objective function, which included the material's chemical composition and two important factors: grain size and precipitates. The results demonstrate that the chemical composition optimized by the algorithm and the objective function are within the limits of a microalloyed steel. This confirms that the selected elements and their proportions are suitable for enhancing the material's strength and mechanical properties.

Keywords: Genetic algorithm, microalloyed steel, HSLA, and chemical composition.

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros HSLA (por sus siglas en inglés, *High-Strength Low Alloy*) o aceros microaleados están considerados como una clase importante de aceros estructurales de alta resistencia, desarrollados para cumplir propiedades mecánicas específicas más que una composición química fija Su éxito radica en la combinación de resistencia, ductilidad y economía en su producción, logradas mediante procesos de laminación controlada y enfriamiento acelerado, sin necesidad de tratamientos térmicos costosos. Estas características han hecho de los aceros microaleados una alternativa eficiente frente a los aceros estructurales tratados térmicamente, con aplicaciones amplias en la ingeniería moderna.

El avance tecnológico ha permitido reemplazar el método tradicional de diseño de aceros basado en la experiencia y consulta de tablas por herramientas computacionales que optimizan propiedades y composiciones químicas. De esta forma, los aceros HSLA se seleccionan según su desempeño ante cargas, corrosión o condiciones ambientales específicas. En México, la industria siderúrgica representa un pilar económico esencial, y la aplicación de métodos computacionales ha acelerado el desarrollo de aleaciones más resistentes, reduciendo tiempo y costo experimental.
En la literatura científica, los algoritmos genéticos han demostrado gran eficacia en la optimización de estructuras y aleaciones metálicas. Investigaciones desde los años noventa han empleado estos métodos para mejorar parámetros de diseño estructural, reducir peso y aumentar resistencia, así como para modelar el comportamiento mecánico de aceros mediante redes neuronales y enfoques multiobjetivo.

Combinaciones de algoritmos genéticos con cálculos termodinámicos, técnicas de colada continua y modelado de frentes de Pareto han permitido desarrollar aceros de ultra-alta resistencia para aplicaciones industriales y aeroespaciales, evidenciando el potencial de la inteligencia computacional en la ciencia de los materiales.
En la actualidad, el diseño de aceros microaleados continúa beneficiándose de enfoques heurísticos y de aprendizaje automático. Estudios recientes, como los de Speer et al. (2020) y Patilkulkarni (2020), muestran los efectos positivos del niobio en la microestructura y propiedades mecánicas del acero, aunque sin aplicar optimización algorítmica. En este contexto, la implementación de algoritmos genéticos (AG) se presenta como una herramienta poderosa para optimizar simultáneamente la composición, el procesamiento y el tratamiento térmico, con el objetivo de maximizar la resistencia y el rendimiento de los aceros microaleados en aplicaciones industriales avanzadas.

En el ámbito de la ciencia de materiales, los AG se han convertido en herramientas clave para optimizar procesos como la fundición, laminación y diseño de aceros. Investigaciones relevantes, como las de Coello y Becerra (2009), Chakraborti et al. (2001), y Xu, Rivera-Díaz-del-Castillo y van der Zwaag (2008, 2009), han combinado AG con modelos termodinámicos, cinéticos y de redes neuronales para mejorar las propiedades mecánicas del acero y reducir la necesidad de ensayos experimentales. Estos métodos computacionales han permitido diseñar aceros de alta y ultra-

alta resistencia con microestructuras controladas y desempeño superior, integrando principios de optimización multiobjetivo basados en frentes de Pareto. Juárez-Chávez et al. (2012) diseñaron una estructura híbrida de vecindad para la optimización de propiedades mecánicas de un acero microaleado en función de su composición química. De igual forma, en otro estudio Ashtari y Barzegar, 2012 ha aplicado AG y lógica difusa para optimizar parámetros estructurales y microestructurales, ampliando su uso hacia la ingeniería de materiales avanzados.

En los últimos años, las mejoras en los AG han permitido desarrollar versiones más robustas y adaptativas. Ejemplo de ello es el algoritmo de múltiples cromosomas con autoajuste de parámetros propuesto por Villalba et al. (2022), que logró reducir significativamente el peso de armaduras de acero. Del mismo modo, Verduzco Martínez et al. (2020) demostraron la eficiencia económica del AG en el diseño de refuerzo estructural, mientras Patel, Sharma y Guo (2025) integraron enfoques híbridos que combinan aprendizaje automático y principios físicos para optimizar microestructuras metálicas. Estos avances, junto con los estudios de Charleux et al. (2001) sobre el comportamiento de precipitados en aceros HSLA, evidencian el potencial de los AG como herramienta central para el diseño inteligente de aceros microaleados con propiedades mecánicas optimizadas.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA: ACERO HSLA

2.1 Resistencia a la fluencia

Para obtener un acero con las mejores propiedades posibles, éstos dependen en gran medida de la temperatura, composición química, microestructura, estructura cristalina y defectos tales como: dislocaciones, tamaño de grano, precipitados, etc. Estas propiedades ejercen una influencia profunda sobre la resistencia y ductilidad de los materiales metálicos (Juárez-Chávez, 2011). Considerada microestructura sensible, la resistencia a la fluencia debe rebasar el nivel de tensión para iniciar su deformación plástica. Por lo tanto, la resistencia a la fluencia es el nivel de tensión en la cual un material muestra una deformación permanente (Askeland, Fulay y Wright, 2010).

El realizar pruebas experimentales constantemente incrementa el costo del acero. Por ende, en este trabajo de investigación se emplea un método computacional como el AG y una función objetivo (ecuación 1), que calcula la aptitud de cada uno de los individuos. La finalidad de emplear una función objetivo es: encontrar la mejor resistencia a la fluencia, así como la configuración de la composición química, tamaño de grano y precipitados. Para calcular la resistencia a la fluencia, se emplea la ecuación (1):

$$\sigma_y = 170 + 1300(wt.\%C) + 45(wt.\%Cu) + 160(wt.\%Cr) + 88(wt.\%Ni) + 160(wt.\%Mn) + 270(wt.\%V) + 130(wt.\%Mo) + \sigma_p + \sigma_g \quad (1)$$

donde: σ_y es el esfuerzo o resistencia a la fluencia, 170 es una constante probada empíricamente, sólo los elementos que más contribuyen al esfuerzo a la fluencia se encuentran en la ecuación (1); $wt.\%C$ es el peso en porcentaje generado aleatoriamente del elemento químico (respetando el rango) el cual se multiplicará por su correspondiente constante; σ_p es la contribución de los precipitados y σ_g es la contribución del tamaño de grano.

La Tabla 1 muestra la composición química del material, la cual está conformada por diez elementos: Fe, C, Cu, Cr, Ni, Mn, Al, V, Ti y Mo (véase Apéndice A. Nomenclatura). El parámetro D_{GB} representa el tamaño de grano, mientras que X corresponde al tamaño promedio de los precipitados. Cinco de los elementos químicos, así como los valores de D_{GB} y X, se generan de manera aleatoria. Los cuatro elementos restantes mantienen valores constantes, y el contenido de Fe se ajusta para equilibrar la composición total al 100%. Cada uno de los elementos generados aleatoriamente, junto con D_{GB} y X, se encuentra acotado por un límite inferior y superior que determina su porcentaje en peso durante el proceso de generación. Los rangos asignados a estos parámetros se encuentran dentro de los valores típicos de un acero microaleado.

Tabla 1. Composición química para el acero microaleado

Fe	C	Cu	Cr	Ni	Mn	Al	V	Ti	Mo	D_{GB}	X
0	0.01	0.019	0.08	0.013	0.84	0.1	0.03	0.1	0.84	0.009	0.000001
	0.2	1.5	0.5	0.77	2.5					0.02	0.002

El objetivo de los aceros microaleados es soportar la mayor cantidad de esfuerzo posible, incluso en presencia de una fractura. Al combinar distintas composiciones químicas, tamaños de grano y características de los precipitados, mediante un método computacional como el algoritmo genético (AG), es posible reducir el costo de producción de estos aceros. El uso de herramientas computacionales permite disminuir la cantidad de pruebas experimentales en laboratorio, lo que se traduce en un ahorro de material. De esta manera, las simulaciones pueden continuar hasta identificar la configuración óptima para posteriormente elaborar el material y comparar su resistencia con la predicha por el AG.

2.2 Tamaño de grano

Un grano es un único cristal en un material compuesto de muchos cristales. Un grano es un arreglo de átomos casi idéntico pero su orientación es distinta en cada grano vecino. Una de las características microestructurales de todo metal es el tamaño de grano. La resistencia a la fluencia depende en gran medida del grano, entre más fino mayor resistencia tendrá. Cuando el tamaño se reduce, se incrementa: la cantidad de granos, el área del límite de grano y la resistencia del material. Una de las ecuaciones para calcular el tamaño de grano es la ecuación de Hall-Petch – ecuación (2) (Askeland, Fulay y Wright, 2010).

$$\sigma_g = \frac{k_y}{\sqrt{D}} \quad D > 0 \quad (2)$$

donde σ_g es la contribución del límite de grano en MPa, D es el diámetro medio del grano, y k_y es la constante de fricción

interna del material, en este trabajo de investigación tiene un valor de 15.1 mm. Mediante la solidificación, la aleación y el tratamiento térmico, se puede controlar el tamaño de grano en los metales y en las aleaciones.

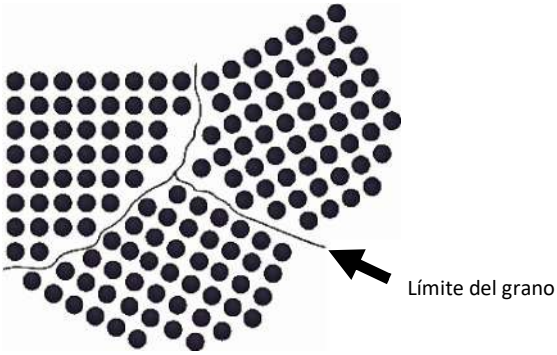


Figura 1. Límite de tres granos (Micrografía cortesía del Dr. A. Deardo.) (Askeland, Fulay y Wright 2010).

2.3 Precipitados

En cualquier aleación endurecida por dispersión debe estar presente más de una fase. La fase continua, que por lo general está presente en mayor cantidad, se denominará la matriz. La segunda fase, presente por lo general en cantidades menores, es el precipitado". (Askeland, 1998).

Para obtener la contribución de los precipitados, se aplicó la Ecuación (3) publicada en (Juárez-Islas y Campillo, 2011):

$$\sigma_p = \left(0.538G\bar{b}\sqrt{f}/X\right)\left(ln\ X/2\bar{b}\right) \quad (3)$$
$$X > 0$$
$$f > 0$$

donde: σ_p es la contribución de los precipitados en MPa, G es el módulo de corte con un valor de 81,600 MPa; b es el vector de Burgers con un valor de 0.248 nm; f es la fracción en volumen de los precipitados con un valor de 0.005; X es el tamaño promedio del diámetro del precipitado.

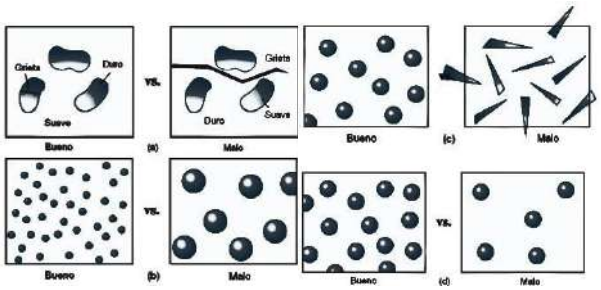


Figura 2. Tipos de precipitados de acuerdo con su forma (Askeland, Fulay y Wright 2010).

3. METODOLOGÍA DE LA SOLUCIÓN

El procedimiento para optimizar las propiedades mecánicas de los aceros microaleados mediante un algoritmo genético (AG) requiere definir los parámetros que intervienen en el proceso y las condiciones bajo las cuales el algoritmo buscará la mejor solución. En esta sección se describen las etapas del AG, su estructura y los operadores evolutivos utilizados.

Los algoritmos genéticos (AG) son métodos de optimización inspirados en la teoría de la selección natural de Darwin, que reproducen el principio de "supervivencia del más apto" para generar soluciones cada vez más eficientes. Mediante procesos de selección, cruzamiento y mutación, los AG evolucionan poblaciones de soluciones hacia un estado óptimo. En este trabajo, se aplica un AG para mejorar la resistencia de un acero microaleado, donde cada individuo representa una posible composición química formada por diez elementos, además del tamaño de grano y el diámetro promedio del precipitado. Estas variables, con rangos definidos, influyen directamente en el esfuerzo a la fluencia y la resistencia del material. A través de sucesivas generaciones, la población evoluciona hasta converger en la mejor combinación de parámetros, es decir, la composición química óptima para maximizar la resistencia del acero.

3.1 Algoritmo genético para Aceros Microaleados

En el desarrollo del algoritmo genético (AG), se establecieron como parámetros de entrada la composición química, el tamaño de grano y las características del precipitado. La función objetivo tiene como propósito evaluar la aptitud de cada individuo dentro de la población. Este valor de aptitud es fundamental, ya que determina la probabilidad de que un individuo sea seleccionado para conformar la siguiente generación. El Algoritmo 1 presenta el AG propuesto para maximizar la resistencia a la fluencia de un acero microaleado (HSLA), junto con los operadores genéticos implementados en su estructura.

Algoritmo 1. Algoritmo genético

```
1: Algoritmo
2:   // P: Población inicial
3:   // CQ: Composición química
4:   // 1. Generar la población inicial
5:  GenerarPoblacionInicial(P, CQ)
6:  // 2. Ciclo principal de generaciones
7:  Para g ← 0 hasta G hacer
8:     subP ← 0
9:    // 3. Subciclo interno de evolución dentro de una generación
10:   Mientras subP < TsubP hacer
11:        // 4. Evaluar aptitud de cada individuo
12        EvaluarPoblacion(P)
13        // 5. Seleccionar individuos más aptos
14:       Seleccionar(P)
15:        // 6. Aplicar cruzamiento para generar descendientes
16:       Cruzar(P)
17:       // 7. Aplicar mutación para mantener diversidad genética
18:       Mutar(P)
19:       subP ← subP + 1
20:   FinMientras
21: FinPara
```

```
22:  // 8. Mostrar o guardar los mejores resultados
23:  MostrarResultados(P)
24: FinAlgoritmo
```

El AG secuencial funciona de la siguiente forma:

1. Se genera la población inicial (P) y se define su tamaño a partir de la composición química (CQ) (Tabla 1), donde cada individuo representa una posible solución al problema de maximizar la resistencia a la fluencia de un acero microaleado.
2. El criterio de paro depende de la cantidad de generaciones (*G*) que la población esté evolucionando para mejorar la aptitud de cada individuo con el propósito de maximizar la resistencia a la fluencia de un acero microaleado.
3. El segundo criterio de paro se usa para dividir la población en subpoblaciones. La variable *TsubP* representa el tamaño de cada subpoblación, mientras que la variable *subP* se irá incrementando hasta alcanzar el valor de *TsubP*, que actúa como el criterio de paro.
4. Para determinar la aptitud de cada individuo, las subpoblaciones de cada generación se evalúan con una función objetivo (ecuación 1). Al completar este proceso, se evaluará la aptitud de toda la población.
5. La selección de individuos se realiza en base a la aptitud calculada en el paso 4. El criterio de selección es simple: se elige al individuo con la mayor aptitud. Para distinguirlo, se le asigna un valor de estatus que indica que ha sido seleccionado.
6. El cruzamiento se realiza entre los individuos con la mayor aptitud, que son los padres previamente seleccionados. Una vez finalizado este proceso, se hace un balance en la composición química de los hijos resultantes para asegurar su factibilidad.
7. Para la mutación, se seleccionan individuos de forma aleatoria, así como uno de sus genes. Estos individuos son los mismos que se generaron en el punto 6. Para distinguirlos, su estatus se activa con un valor de 1.
8. Se incrementa la variable que controla las subpoblaciones. Cuando se alcanza el criterio de paro interno (*TsubP*), se incrementa la variable que controla el número de generaciones (*g*). Esta última debe alcanzar el valor de la constante de paro (*G*), que ha sido previamente sintonizada.
9. Finalmente, se obtiene el resultado. En este paso, queda registrado el mejor individuo con la mayor aptitud (resistencia a la fluencia).

3.1.1 Representación simbólica

La composición química del acero está integrada por diez elementos (Tabla 1). De ellos, cinco se generan aleatoriamente dentro de un rango mínimo y máximo. Dichos rangos fueron establecidos con base en los valores que permiten optimizar la resistencia a la fluencia. Los cuatro elementos restantes mantienen un valor constante, con el fin de contribuir a la resistencia mecánica y preservar las propiedades del acero microaleado (HSLA). Una vez asignados los valores aleatorios de los cinco elementos variables, se calcula la suma de sus porcentajes junto con los correspondientes a los cuatro elementos constantes. Este total se sustrae de cien; la diferencia obtenida corresponde al porcentaje en peso de Fe. En caso contrario, el valor del Fe se ajusta para equilibrar la composición química y garantizar que la suma total sea del 100 %.

Al ejecutar el Algoritmo 1, la función encargada de generar la población inicial (línea 5) recibe como parámetros la composición química y un arreglo destinado al almacenamiento de la subpoblación. Posteriormente, se inicia el ciclo principal, en el cual *g* actúa como contador de generaciones y establece el criterio de terminación del proceso evolutivo (línea 7). En la función EvaluarPoblacion (línea 12), se determina la aptitud de cada individuo mediante la función objetivo descrita en la Ecuación 1.

La Tabla 2 muestra un ejemplo representativo de la población generada. Cada fila corresponde a un individuo (solución), conformado por los elementos de la composición química, representados en las columnas, con diferentes porcentajes en peso asignados de manera aleatoria. En este ejemplo, la población está compuesta por diez individuos.

Tabla 2. Muestra de la población inicial generada con diez individuos (soluciones).

Fe	C	Cu	Cr	Ni	Mn	Al	V	Ti	Mo	D_{GB}	X
95.145	0.191	0.228	0.5	0.366	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.019	0.000011
95.351	0.152	1.242	0.278	0.1	1.807	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011
93.46	0.2	1.5	0.5	0.77	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.014	0.000011
95.069	0.2	0.611	0.5	0.77	1.78	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011
94.24	0.07	1.5	0.5	0.12	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.016	0.000011
93.817	0.2	1.309	0.334	0.77	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011
94.311	0.198	1.5	0.375	0.046	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.017	0.000011
94.357	0.097	1.271	0.5	0.205	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011
93.46	0.2	1.5	0.5	0.77	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.012	0.000011
94.504	0.198	0.729	0.5	0.77	2.229	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011

3.1.2 Operador de selección

Para la selección, se aplicó el operador de torneo. Esta técnica fue seleccionada para la investigación debido a que, de acuerdo con la literatura, es la que consistentemente genera los resultados óptimos. A continuación, se detalla su funcionamiento:

1. De la población, se seleccionan en forma aleatoria dos individuos (*p*). La forma en la que compiten es con su aptitud (esfuerzo a la fluencia), la cual se obtiene aplicando la función objetivo (Ecuación 1).
2. Se compara la aptitud de ambos individuos y el que tenga el mejor valor es el seleccionado; es decir, será un probable padre que será elegido en el siguiente operador para generar a un nuevo individuo (hijo).

Para ilustrar el funcionamiento del operador de selección, se utiliza una muestra compuesta por diez individuos. De ellos, se seleccionaron cuatro de manera aleatoria (indicados con

flechas). El orden de selección obtenido fue el siguiente: cinco, cero, tres y nueve (Tabla 3).

Tabla 3. Población inicial evaluada (aptitud) para realizar la selección por torneo

	F/C	Fe	C	Cu	Cr	Ni	Mn	Al	V	Ti	Mo	D	X	Aptitud
2→	0	95.145	0.191	0.228	0.5	0.366	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.019	0.000011	1384.509399
	1	95.351	0.152	1.242	0.278	0.1	1.807	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	1251.084473
	2	93.46	0.2	1.5	0.5	0.77	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.014	0.000011	1507.072754
3→	3	95.069	0.2	0.611	0.5	0.77	1.78	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	1375.24939
	4	94.24	0.07	1.5	0.5	0.12	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.016	0.000011	1272.630493
1→	5	93.817	0.2	1.309	0.334	0.77	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	1495.299438
	6	94.311	0.198	1.5	0.375	0.046	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.017	0.000011	1408.954224
	7	94.357	0.097	1.271	0.5	0.205	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	1336.529419
	8	93.46	0.2	1.5	0.5	0.77	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.012	0.000011	1517.297974
5→	9	94.504	0.198	0.729	0.5	0.77	2.229	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	1449.799438

Los individuos seleccionados compiten entre sí en función de su valor de aptitud, con el propósito de conformar la siguiente población. De cada par de competidores, el individuo con mayor aptitud es designado como progenitor de la siguiente generación.

En el ejemplo ilustrativo, los primeros pares de individuos que compiten (seleccionados nuevamente de forma aleatoria) son el cinco y el cero, y posteriormente el nueve y el tres. Los individuos con mayor aptitud en cada enfrentamiento corresponden a los números cinco y nueve, los cuales se indican con flechas en la Figura 3. Estos individuos serán los padres que darán origen a la siguiente generación.

	95.145	0.191	0.228	0.5	0.366	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.019	0.000011	1384.509399
→	93.817	0.2	1.309	0.334	0.77	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	1495.299438
	95.069	0.2	0.611	0.5	0.77	1.78	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	1375.24939
→	94.504	0.198	0.729	0.5	0.77	2.229	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	1449.799438

Figura 3. Individuos con mayor aptitud seleccionados por torneo.

3.1.3 Operador de cruzamiento

Una vez conformado el grupo de individuos seleccionados, se procede a la etapa de cruzamiento. En esta fase, se lleva a cabo un intercambio de información genética entre los individuos, con el propósito de generar los descendientes que integrarán la siguiente generación.

En el presente trabajo se emplea el cruzamiento de un punto (Figura 4), el cual opera de la siguiente manera: se selecciona de forma aleatoria un punto de corte dentro de la cadena (de acuerdo con su longitud) y, a partir de dicho punto, se realiza el intercambio de información genética entre los padres. Como resultado, se obtienen dos nuevos individuos (Figura 5), que heredan los genes de sus respectivos progenitores, denominados padre uno (P1) y padre dos (P2).

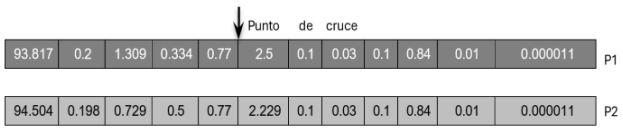


Figura 4. Cruzamiento en un punto de cruce.

En la Figura 5, para los individuos seleccionados mediante el método de torneo, el punto de cruce se determina de manera aleatoria, ubicándose entre el gen 4 y el gen 5. En dicho punto de corte se lleva a cabo el cruzamiento, a partir del cual se generan los dos descendientes que conformarán la siguiente generación (Figura 5).

												Sin balancear	Hijo
93.817	0.2	1.309	0.334	0.77	2.229	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	99.729	H1
94.504	0.198	0.729	0.5	0.77	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	100.271	H2

Figura 5 Hijo uno y dos generados en el cruzamiento.

Una vez generados los descendientes (H1 y H2, Figura 5) durante el cruzamiento, se lleva a cabo un proceso de balance con el fin de preservar la factibilidad de las soluciones obtenidas (Figura 6). El ajuste se aplica sobre el primer gen, correspondiente al *Fe*, por tratarse del componente principal y el de mayor porcentaje en peso dentro de la composición química.

											Balanceado
94.088	0.2	1.309	0.334	0.77	2.229	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	100
94.233	0.198	0.729	0.5	0.77	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	100

Figura 6. Balance de los hijos uno y dos. El cien indica la factibilidad del individuo

3.1.4 Operador de mutación

En la etapa de mutación, el último operador genético, se selecciona aleatoriamente un individuo y uno de sus genes para sustituir el valor actual por un nuevo valor, respetando siempre el rango permitido. Los genes susceptibles de mutación son aquellos que poseen un valor mínimo y máximo definidos dentro de la composición química, siendo por tanto los únicos modificables; los demás genes permanecen constantes.

Si el gen seleccionado aleatoriamente corresponde a alguno de los cinco elementos químicos, se realiza un balance en el individuo para conservar la factibilidad de la composición. En cambio, si el gen pertenece al tamaño de grano (D_{GB}) o al precipitado (X), no se aplica dicho ajuste, dado que estos factores microestructurales no dependen directamente de la composición química.

Para ilustrar este operador, en la Figura 7 se muestra el caso en que el gen 2 fue seleccionado para la mutación. Una vez generado el nuevo valor (porcentaje en peso), se efectúa el balance correspondiente en dicho individuo (Figura 8).

94.088	0.2	1.309	0.334	0.77	2.229	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	H1

Figura 7. Gen seleccionado aleatoriamente para realizar la mutación

95.378	0.2	0.019	0.334	0.77	2.229	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	100

Figura 8. Composición química balanceada después de la mutación

La ejecución del algoritmo 1 continúa hasta alcanzar la convergencia. El contador *subP* (línea 19) se incrementa cada vez que se completan las operaciones correspondientes a los operadores genéticos. De manera análoga, el contador *g* se

incrementa al finalizar cada generación, repitiéndose el ciclo y sus instrucciones hasta cumplir con el criterio de terminación establecido.
Una vez alcanzada dicha condición (línea 23), el algoritmo genera un archivo de salida que contiene el mejor individuo identificado, es decir, aquel con la mayor aptitud obtenida durante la ejecución del algoritmo genético (AG).

La figura 9 muestra el diagrama de flujo del AG, el cual se desarrolla de la siguiente manera:

1. Se inicializan las variables que utiliza el AG.
2. Al contador *g* se le asigna un cero.
3. Entra al ciclo externo. Se evalúa la condición donde *g*, es una variable que se va a incrementar durante la ejecución del AG secuencial hasta alcanzar el criterio de paro, representado por G, constante que contiene el número de generaciones que la población debe evolucionar y la cual fue sintonizada.
4. Posteriormente, se evalúa el ciclo interno donde *subP* lleva el control de las subpoblaciones y *TsubP* es el criterio de paro, el cual contiene el número total de subpoblaciones. Mientras *subP* siga siendo menor que *TsubP*, se ejecutan los siguientes pasos.
5. Se evalúa la *subpoblación*$_i$.
6. Se seleccionan los individuos de la s*ubpoblación*$_i$ de acuerdo con su aptitud, la cual se obtuvo en el paso anterior (5).
7. Con los individuos seleccionados, se realiza el cruzamiento en un punto para generar a los individuos que formarán la siguiente generación.
8. La mutación se realiza en forma aleatoria, en un gen, sobre los individuos generados en el paso anterior (7).
9. Se obtiene la aptitud de cada uno de los nuevos individuos que integran la subpoblación.
10. Se actualiza la base de datos (BD) con la *subpoblación*$_i$. La BD se forma con el total de las subpoblaciones generadas (paso 7).
11. Se incrementa el contador *subP* en uno. Si *subP* aún no alcanza el criterio de paro *TsubP*, regresa al paso 5. De lo contrario, continúa con el siguiente paso (12).
12. Se evalúa la condición donde *dif* contiene la diferencia que, al compararse con la constante ε_0, indica si existe o no diversidad en la *subpoblación*$_i$ evaluada. Si *dif* cumple la condición, continúa el flujo en el siguiente paso (13), de lo contrario, se va hasta el paso 14.
13. Se realiza la diversidad, el cual es un cruzamiento entre las subpoblaciones almacenadas en la BD.
14. Se incrementa la variable g y continúa con el paso 3. De lo contrario, se realiza el siguiente paso (15).
15. Almacenar los resultados en un archivo de texto.
16. FIN del flujo para el AG.

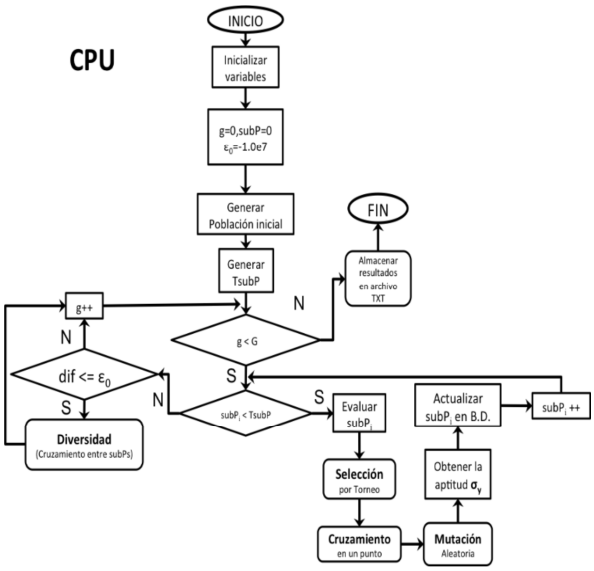


Figura 9. Diagrama de Flujo del AG para obtener la resistencia a la fluencia óptima del acero microaleado.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL ALGORITMO GENÉTICO

Para esta investigación se utilizó el clúster Cuexcomate, ubicado en el Laboratorio de Optimización de Software en el CIICAp de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. La infraestructura de este clúster está compuesta por:

- Comunicaciones: Un Switch 3COM y un Switch InfinibandTM.
- Nodo maestro: Cuenta con 2 procesadores Intel Xeon Six Core (12 cores en total), 24 GB de RAM y 12 TB de disco duro.
- Nodos de procesamiento (01-04): Poseen 2 procesadores Intel Xeon Six Core cada uno (48 cores en total para los cuatro), 96 GB de RAM en total y 2 TB de disco duro en total.
- Nodo de procesamiento GPU (05): Tiene 1 procesador Intel Xeon Six Core (896 cores en total), 36 GB de RAM, 1 TB de disco duro y 2 tarjetas NVIDIA TESLA C2070.

Se realizó la sintonización de los parámetros, los valores obtenidos mediante el análisis de sensibilidad para cada uno de los operadores genéticos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros sintonizados del AG obtenidos del análisis de sensibilidad.

PARÁMETRO	VALOR
ε	$1x10^{-7}$
G	70000
S/C	50%
M	10%
P_T	26400

El parámetro ε indica la diversidad de la población, es decir, el grado de similitud entre individuos de una subpoblación respecto a otra. G representa el número de generaciones durante las cuales la población total debe evolucionar. S/C corresponde al porcentaje de individuos seleccionados y sometidos al cruzamiento mediante los operadores genéticos de Selección y Cruzamiento, mientras que M indica el porcentaje de individuos que serán mutados. Finalmente, PT determina la cantidad total de individuos que conforman la población.

Tras realizar la sintonización de parámetros y ejecutar una prueba de 30 corridas, los resultados obtenidos (un total de 50 valores) producidos por el algoritmo genético (AG) se almacenaron en un archivo de texto, con el fin de calcular posteriormente las diferentes medidas de tendencia central (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados del análisis estadístico del AG.

Medida	Resultado
$\bar{X}$	1530.4544677734375
M_o	-
M_e	1530.4544677734375
S	0
Peor	1530.4544677734375
Mejor	1530.4544677734375
Promedio	1530.4544677734375

donde:

Los resultados estadísticos $(\bar{x}, M_e)$ muestran que el valor promedio del esfuerzo a la fluencia $\sigma_y = 1530.4544677735375\, MPa$ y al ser iguales ambos resultados se tiene una desviación estándar (s) de cero, es decir se concluye que no existe variación en la dispersión de los datos.

La figura 10 muestra la mejor configuración generada con los valores establecidos dentro del rango de cada uno de los elementos químicos que integran la composición química. El peso en porcentaje (wt.%) generado para el: Fe=93.460014 wt.%, C= 0.2 wt.%, Cu=1.5 wt.%, Cr=0.5 wt.%, Ni=0.77 wt.%, Mn=2.5 wt.%, Al: 0.1 wt.%, V=0.03 wt.%, Ti= 0.1 wt.% y Mo=0.84 wt.%. El tamaño de grano (D_{GB}) se queda con un valor de: 0.01; el diámetro del precipitado (X): 0.000011; finalmente, el esfuerzo a la fluencia (σ_y) obtenido es: 1530.4544677734375 MPa.

Fe	C	Cu	Cr	Ni	Mn	Al	V	Ti	Mo	dGB	X	σ_y
93.460014	0.2	1.5	0.5	0.77	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	1530.4544677734375

Figura 10. Mejor configuración obtenida por el AG.

De acuerdo con la literatura el esfuerzo a la fluencia de los aceros microaleados, el resultado obtenido mediante el AG está clasificado dentro de los aceros UHSS (por sus siglas en inglés *Ultra High-Strengh Steel*); es decir, de Ultra Alta Resistencia. La razón por la cual pertenece a este rubro se debe a la cantidad de C en la composición química, ya que se considera parte de los aceros de medio carbono de baja aleación.

5. CONCLUSIONES

Las pruebas experimentales realizadas al Algoritmo Genético (AG), que incorporaron la composición química (diez elementos), el tamaño de grano y el diámetro promedio del precipitado, demostraron la eficiencia del algoritmo al obtener resultados en un menor tiempo de ejecución.

El resultado predicho o el valor optimizado del esfuerzo a la fluencia (σ_y), superó la clasificación de los aceros de Baja Aleación y Alta Resistencia (HSLA). Este valor se posiciona en el rango de un acero de medio carbono, lo que lo clasifica dentro de la categoría de Aceros de Ultra Alta Resistencia (UHSS).

Trabajo futuro:

Desarrollar el material con la mejor configuración obtenida por medio del AG. Se le realizarán las pruebas para medir su resistencia y comparar los resultados del material con los obtenidos por el AG para evaluar la eficacia de este.

REFERENCIAS

Ashtari, P., & Barzegar, F. (2012). Accelerating fuzzy genetic algorithm for the optimization of steel structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 45(12), pp. 275-285.

Askeland, D. R. (1998). Ciencia e ingeniería de los materiales. México International Thompson Editores

Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2010). The Science and Engineering of Materials. USA: Cengage Learning.

Béjari, L., Hernández, C. A., Mancilla, J. E., & Espinosa, F. (2002). Estudio Mediante Microscopia Electrónica de Transmisión de Precipitados de Carburo de Niobio en un Acero Microaleado. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 22, pp. 21-25.

Chakraborti, N., Kumar, R., & Jain, D. (2001). A study of the continuous casting mold using a pareto-converging genetic algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 25, pp. 287-297.

Charleux, M., Poole, W. J., Militzer, M., & Deschamps, A. (2001). Precipitation behavior and its effect on strengthening of an HSLA-Nb/Ti steel. *Metallurgical and Materials Transactions A, 32*(7), 1635-1647. https://doi.org/10.1007/s11661-001-0142-6

Coello Coello, C. A., & Becerra, R. L. (2009). Evolutionary multiobjective optimization in materials science and engineering. *Materials and manufacturing Processes*, 24, pp. 119-129.

Juárez-Chávez, J. Y. (2011). Algoritmo de Recocido Simulado para Maximizar la Resistencia Mecánica en Aceros Microaleados (tesis de Maestría). Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos.

Juárez-Chávez, J. Y., Cruz-Chávez, M. A., Barquera, S. S. A., Campillo,I. B., Peralta-Abarca, J. C., Martínez-Bahena,

B., & Moreno-Bernal, P. (2012). Neighborhood Hybrid Structure for the Optimization of Mechanical Properties of a Microalloyed Steel Based on Its Chemical Composition. 2012 IEEE Ninth Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, pp. 147-152.

Juárez-Islas, J., Campillo, B. (2011). Análisis de la Relación Entre Composición Química, Tamaño de Grano y Precipitados con las Propiedades Mecánicas de Aceros Experimentales Microaleados. Trabajo sin publicar.

Patel, D., Sharma, R., & Guo, Y. B. (2025). *Computational, Data-Driven, and Physics-Informed Machine Learning Approaches for Microstructure Modeling in Metal Additive Manufacturing*. arXiv preprint. https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.01424

Patilkulkarni, A. A. (2020). *Niobium-alloyed steels for automotive transmission and powertrain applications* (Tesis de maestría, Politécnico de Turín). Politecnico di Torino. Recuperado de https://webthesis.biblio.polito.it/18968/1/tesi.pdf

Speer, J., Whitley, B., Kaster, S., Findley, K., Matlock, D., & De Moor, E. (2020). *Selected developments in Nb-microalloyed forgings for induction hardening, and pearlitic wire rod*. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, 17(2), 164–169. https://doi.org/10.4322/2176-1523.20202325

Verduzco Martínez, L. F., & Horta Rangel, J. M. (2020). Optimización de acero de refuerzo con el Algoritmo Genético para el diseño de columnas de concreto. 14vo Coloquio de Investigación, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro.

Villalba-Morales, J. D., & Ramírez-Echeverry, S. (2021). Optimización de armaduras espaciales de acero utilizando algoritmos genéticos auto-adaptados: una primera aproximación. *Ingeniería y Competitividad*, *23*(1),7337.

Xu, W. , Rivera-Díaz-del-Castillo, P. E. J. & van der Zwaag, S. (2008). Genetic alloy design based on thermodynamics and kinetics, Philosophical Magazine, 88 (12), pp. 1825 — 1833

Xu, W., Rivera Díaz del Castillo, P. E. J. Van Der Zwaag, S. (2009). A combined optimization of alloy composition and aging temperature in designing new UHS precipitation hardenable stainless steels. *Computational Materials Science*, 45 (2), pp. 467-473.

Xu, W., Rivera-Díaz-del-Castillo, P. E. J., & van der Zwaag, S. (2008). Designing Nanoprecipitation Strengthened UHS Stainless Steels Combining Genetic Algorithms and Thermodynamics. *Computational Materials Science*, 44 (2), pp. 678-689.

Xu, W., Rivera-Díaz-del-Castillo, P. E. J., & van der Zwaag, S. (2009). Computational design of UHS maraging stainless steels incorporating composition as well as austenitisation and ageing temperatures as optimisation parameters. *Philosophical Magazine*, 89(20), pp. 1647-1661.

Apéndice A. Nomenclatura

Fe	Fierro
C	Carbono
Cu	Cobre
Cr	Cromo
Ni	Níquel
Mn	Manganeso
Al	Aluminio
V	Vanadio
Ti	Titanio
Mo	Molibdeno
D_{GB}	Tamaño de grano
X	Radio del precipitado
AG	Algoritmo genético

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Fuzzy Inference Modeling for Estimation of Boarding and Alighting Times in Passengers with Limited Mobility

Ricardo Pérez Cabrera * **Rodolfo Eleazar Pérez Loaiza** *
Perfecto Malaquías Quintero Flores *

* *Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Apizaco, Av. Instituto Tecnológico s/n, Conurbado Tzompantepec, 90300, Apizaco, Tlaxcala, México (e-mail: m17370613@apizaco.tecnm.mx, rodolfo.pl@apizaco.tecnm.mx, perfecto.qf@apizaco.tecnm.mx).*

Abstract: This study presents a fuzzy inference system (FIS) designed to estimate the boarding and alighting dwell times of passengers with limited mobility within a Dial-a-Ride Problem (DARP) framework. The model was first developed in Microsoft Excel and later implemented in Python 3.12.4 (NumPy, Matplotlib) for integration into the routing system. A dataset of 250 field observations collected in hospitals in Apizaco, Tlaxcala was used for model construction and manual tuning. Validation using representative cases from each mobility group yielded determination coefficients (R^2) above 0.86 and low mean errors, confirming its reliability for real-world transport planning.

Keywords: Fuzzy logic, Fuzzy inference system, Dial-a-Ride Problem, Dwell time estimation, Passengers with limited mobility, Accessible transport

1. INTRODUCCIÓN

El acceso oportuno a la atención médica constituye un componente esencial del derecho a la salud, reconocido internacionalmente por la Organización Mundial de la Salud y la Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos (ACNUDH, 2025) ACNUDH (2025). Sin embargo, en México, diversos sectores de la población —personas con discapacidad, adultos mayores y mujeres embarazadas— enfrentan dificultades significativas para desplazarse hacia los servicios de salud, lo que limita el ejercicio efectivo de este derecho.

En el municipio de Apizaco, Tlaxcala, las limitaciones estructurales del transporte público dificultan la accesibilidad de las personas con movilidad limitada. Si bien existen iniciativas estatales y municipales —como el transporte gratuito para personas con discapacidad o los traslados especializados del Sistema DIF (de Oriente (2013); de Apizaco (2025))—, su cobertura y frecuencia resultan insuficientes para atender la demanda cotidiana. Esta situación exige soluciones de planificación más precisas que optimicen recursos y garanticen la accesibilidad al sistema de salud.

En este contexto, el presente trabajo propone el desarrollo de un sistema de inferencia difusa (FIS) tipo Mamdani para estimar los tiempos de ascenso y descenso de personas con movilidad limitada. El modelo utiliza 250 registros observados en hospitales y centros de salud del municipio de Apizaco y se integra como componente complementario dentro de un esquema de planificación de rutas basado en el Dial-a-Ride Problem (DARP).

El objetivo principal de esta investigación es modelar un sistema difuso capaz de representar la variabilidad de los tiempos de servicio (dwell time) mediante variables lingüísticas asociadas a la movilidad del usuario y la accesibilidad del entorno. Los objetivos específicos incluyen:

(1) analizar estadísticamente los datos obtenidos por medio de observación para definir los universos de discurso y funciones de membresía;
(2) implementar el modelo difuso en Python como herramienta complementaria para un sistema DARP; y
(3) validar su desempeño mediante métricas de error y coeficientes de ajuste.

De esta manera, el modelo aporta una base flexible y reproducible para la planificación de rutas orientadas a personas con movilidad limitada.

2. TRABAJOS RELACIONADOS Y FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Contexto social del problema

El acceso a los servicios de salud en México continúa condicionado por factores de movilidad, especialmente entre las personas con discapacidad, adultos mayores y mujeres embarazadas. Diversos estudios y reportes nacionales identifican la distancia al centro de atención y la falta de transporte adaptado como causas recurrentes de inasistencia médica. La ENSANUT 2022 reporta que el 20% de los casos urbanos y el 17% de los rurales no acuden a consulta por dificultades de traslado Bautista-Arredondo et al. (2023).

En el estado de Tlaxcala, más de 54 000 personas presentan algún tipo de discapacidad, y en el municipio de Apizaco una proporción significativa pertenece a grupos con movilidad reducida (Gobierno de México, 2025; INEGI, 2020). A pesar de los programas de apoyo existentes —como el transporte gratuito para personas con discapacidad o los servicios del DIF municipal de Oriente (2013); de Apizaco (2025)—, su cobertura sigue siendo limitada. Este escenario evidencia la necesidad de estrategias de planificación que integren la dimensión social del problema con modelos operativos capaces de optimizar los recursos de transporte disponibles.

2.2 Fundamento teórico

El Dial-a-Ride Problem (DARP) es un modelo de optimización combinatoria orientado a la planificación de rutas y horarios en sistemas de transporte de pasajeros con restricciones de capacidad, tiempo y servicio Tóth et al. (2024). Su aplicación en contextos de transporte para personas con movilidad limitada ha permitido mejorar la eficiencia logística y reducir los tiempos de espera Nasir et al. (2022).

Un componente crítico en este tipo de sistemas es el *dwell time*, entendido como el tiempo que el vehículo permanece detenido en cada parada para permitir el ascenso o descenso de los usuarios. Investigaciones recientes han demostrado que este parámetro presenta una alta variabilidad, influida por el tipo de herramienta de apoyo utilizada, las condiciones del entorno y el nivel de asistencia requerido Kostyniuk and D'Souza (2020); Garnier et al. (2020); Kuipers et al. (2025). Dicha variabilidad dificulta la aplicación de enfoques deterministas tradicionales, lo que motiva el uso de técnicas flexibles que modelen la incertidumbre en el comportamiento humano.

En este contexto, los sistemas de inferencia difusa (FIS) constituyen una herramienta adecuada para representar relaciones no lineales entre variables lingüísticas y cuantitativas. Su interpretabilidad y capacidad para trabajar con información imprecisa han favorecido su adopción en el ámbito de la movilidad urbana, tanto para estimar preferencias de usuarios Naumov et al. (2021) como para mejorar decisiones de ruteo en entornos dinámicos Rahmani et al. (2022).

En síntesis, los estudios revisados evidencian que la variabilidad del *dwell time* constituye un factor crítico en la planificación del transporte para personas con movilidad limitada y que los métodos deterministas no capturan adecuadamente dicha incertidumbre. La literatura reciente sugiere que los sistemas difusos pueden representar de forma más precisa la interacción entre condiciones humanas y operativas. Con base en estos fundamentos, la siguiente sección describe el proceso metodológico adoptado para construir y validar un modelo de inferencia difusa orientado a la estimación de tiempos de servicio en este tipo de transporte especializado.

3. METODOLOGÍA

La metodología adoptada en este trabajo se enmarca en un enfoque cuantitativo y aplicado, orientado al desarrollo y validación de un sistema de inferencia difusa (FIS) para la estimación del *dwell time* en cada parada. El diseño metodológico es de tipo experimental, basado en observaciones reales y en la construcción iterativa del modelo difuso, con el fin de representar los patrones de comportamiento identificados en los datos. El proceso metodológico seguido para la construcción del modelo general FIS se resume en la Figura 1.

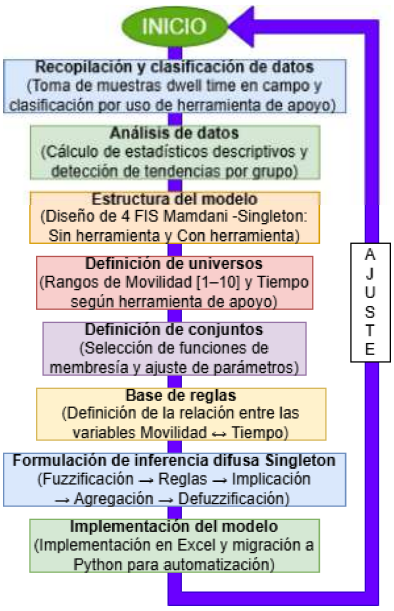


Fig. 1. Esquema general de la metodología empleada para el desarrollo del modelo FIS.

3.1 Recopilación y clasificación de datos

Para la obtención de muestras, se realizaron observaciones cronometradas en hospitales y centros de salud del municipio de Apizaco, Tlaxcala, registrando los tiempos de ascenso y descenso de personas con movilidad limitada. En total se recopilaron 250 registros, los cuales cuentan con el grado de movilidad del usuario, la herramienta de apoyo utilizada y el *dwell time* observado, posteriormente los registros fueron clasificados en dos grupos principales: usuarios que requerían el uso de una herramienta de apoyo para su movilidad, identificados como *con herramienta* y usuarios que no necesitaban ningún tipo de ayuda técnica, clasificados como *sin herramienta*. En la categoría con *con herramienta*, se realizó una subdivisión adicional que distinguió tres conjuntos según el tipo de apoyo utilizado: bastón, andadera y silla de ruedas. Por su parte, el grupo *sin herramienta*, estuvo conformado por personas con movilidad reducida, como adultos mayores y mujeres embarazadas pero sin realizar distinciones dentro del conjunto.

Dado que los sistemas de inferencia difusa no requieren un proceso de entrenamiento supervisado, la totalidad de las observaciones se emplearon para definir y ajustar los universos de discurso y las funciones de membresía. Para la aplicación de pruebas del modelo, se realizó una selección estratificada de 15 casos representativos por grupo. Este procedimiento permitió evaluar la coherencia del sistema sin comprometer su interpretabilidad.

3.2 Análisis de datos

Se realizó un análisis estadístico descriptivo, cuyos resultados se presentan en la Tabla 1. Dicho análisis incluye medidas de tendencia central (media) y de dispersión (mínimo, máximo, desviación estándar y varianza), permitiendo cuantificar tanto el valor promedio de los tiempos observados como su grado de variabilidad dentro de cada grupo. En los resultados se aprecia una tendencia ascendente del *dwell time* conforme aumenta la dependencia hacia la herramienta de apoyo, lo que refuerza la relación directa entre el tipo de ayuda utilizada y los tiempos registrados.

En el grupo *sin herramienta* se registraron los tiempos de ascenso y descenso más bajos y homogéneos, con una media de 13.04 s y una desviación estándar de 4.75 s. En contraste, los usuarios del grupo *con herramienta* presentaron incrementos progresivos en el dwell time según el tipo de apoyo utilizado. Para quienes emplearon bastón, el promedio aumentó a 29.82 s con una desviación de 12.18 s, reflejando una variabilidad moderada asociada al uso de la ayuda técnica. En el caso de la andadera, los valores alcanzaron una media de 38.52 s y una desviación de 16.59 s, donde influyeron factores contextuales como el espacio disponible o el tipo de superficie. Finalmente, los usuarios de silla de ruedas registraron los tiempos más elevados, con una media de 102.11 s y una desviación de 41.32 s, lo que evidencia su alta dependencia de la herramienta de apoyo, la necesidad de asistencia adicional y la sensibilidad del proceso ante las condiciones del entorno.

Table 1. Estadísticos descriptivos del *dwell time* conforme a la herramienta de apoyo utilizada.

Herramienta	**N**	$\bar{X}$	$X_{\min}$	$X_{\max}$	s	s^2
Sin herramienta	60	13.04	4.12	25.80	4.75	22.54
Bastón	85	29.82	5.44	62.39	12.18	148.33
Andadera	75	38.52	13.63	85.94	16.59	275.25
Silla	30	102.11	18.43	163.87	41.32	1707.16

3.3 Estructura del modelo

Se decidió implementar cuatro sistemas de inferencia difusa independientes con el fin de representar de manera más precisa la heterogeneidad en los tiempos de ascenso y descenso observados entre los distintos tipos de usuarios. La clasificación inicial distingue dos grupos generales: personas sin herramienta y personas con herramienta de apoyo; sin embargo, dentro de este último se identificaron diferencias significativas en el comportamiento de los usuarios que emplean bastón, andadera o silla de ruedas. Estas variaciones justifican el diseño de un sistema específico para cada subgrupo, dando lugar a un total de cuatro sistemas que, en conjunto, conforman el modelo difuso global.

3.4 Definición de universos

Los cuatro sistemas se modelaron siguiendo la misma estructura general. Para todos ellos se definió una única variable lingüística de entrada denominada *Movilidad*, la cual representa la de capacidad funcional que el usuario demuestra al desplazarse, evaluada por el observador en una escala de 1 a 10

En cuanto al universo de salida, se estableció una variable lingüística denominada *Tiempo*, que representa el *dwell time* o tiempo de parada requerido para que el usuario ascienda o descienda del vehículo. Los rangos de esta variable varían según el tipo de herramienta de apoyo utilizada, conforme a los valores mínimos y máximos registrados en cada grupo:

- Sin herramienta: [4, 26] s
- Bastón: [5, 63] s
- Andadera: [13, 86] s
- Silla de ruedas: [18, 164] s

3.5 Definición de conjuntos

El universo de entrada se discretizó en cinco términos lingüísticos que permiten representar de manera gradual los distintos niveles de desplazamiento observados:

Movilidad: Muy baja, Baja, Media, Alta y Muy alta.

De manera análoga al universo de entrada, el universo de salida se discretizó en cinco términos lingüísticos con el propósito de reflejar transiciones graduales entre conjuntos y preservar la relación directa entre el grado de movilidad del usuario y el tiempo estimado de servicio.

Tiempo: Muy corto, Corto, Regular, Largo y Muy largo.

Debido a la alta variabilidad observada en los datos muestrales, se realizaron pruebas comparativas para definir el tipo de función de membresía adecuada para representar los datos, empleando funciones triangulares, trapezoidales, de tipo campana y gaussianas. Las primeras generaron transiciones abruptas o zonas insensibles entre conjuntos adyacentes, mientras que las gaussianas ofrecieron una respuesta continua y estable ante variaciones pequeñas en la entrada. Por esta razón, se seleccionaron funciones gaussianas, capaces de modelar de forma realista la incertidumbre y la gradualidad del comportamiento humano, ya que esta función suaviza los límites entre los conjuntos lingüísticos y mejora la estabilidad inferencial.

La función gaussiana utilizada se expresa en la Ecuación (1):

$$\mu(x) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \tag{1}$$

donde x representa la variable analizada, c el centro del conjunto difuso y σ la desviación estándar que determina su grado de dispersión.

Como un ajuste inicial los parámetros de las funciones gaussianas (c y σ) se determinaron en base a los cuantiles característicos de cada término lingüístico, estimando σ mediante el IQR ajustado con el factor 1.349, equivalente a la desviación estándar en una distribución normal. Posteriormente, se realizaron ajustes manuales iterativos para mejorar la continuidad entre conjuntos y preservar la interpretabilidad del sistema evitando métodos automáticos de optimización.

Los parámetros finales de los conjuntos difusos para cada grupo se resumen en las Tablas 2 y 3, que presentan los valores de los centros (c) y desviaciones estándar (σ)

correspondientes a las funciones de membresía de entrada y salida. Estos valores reflejan la variabilidad característica de cada conjunto poblacional y permiten reproducir de manera exacta la configuración de los universos de discurso empleados.

Table 2. Parámetros de funciones de membresía (Universos de entrada: Movilidad).

Término	Sin Herra.	Bastón	Andadera	Silla
Muy baja	(1.0, 1.0)	(1.0, 1.0)	(1.0, 1.0)	(1.0, 1.0)
Baja	(3.0, 1.0)	(3.0, 0.875)	(3.0, 0.9)	(3.0, 0.875)
Media	(5.5, 1.0)	(5.5, 1.0)	(5.5, 1.2)	(5.5, 1.0)
Alta	(8.0, 1.0)	(8.0, 0.875)	(8.0, 0.9)	(8.0, 0.875)
Muy alta	(10.0, 1.0)	(10.0, 1.0)	(10.0, 1.0)	(10.0, 1.0)

Table 3. Parámetros de funciones de membresía (Universos de salida: Tiempo).

Término	Sin Herra.	Bastón	Andadera	Silla
Muy corto	(4, 2.0)	(5, 6.0)	(13, 6.0)	(18, 15.0)
Corto	(9, 2.25)	(19, 7.0)	(31, 8.0)	(54, 16.0)
Regular	(15, 2.0)	(34, 6.0)	(49.5, 10.0)	(91, 15.0)
Largo	(21, 2.25)	(49, 7.0)	(68, 8.0)	(128, 16.0)
Muy largo	(26, 2.0)	(63, 6.0)	(86, 6.0)	(164, 15.0)

Fig. 2. Universo de entrada *Movilidad_ Sin Herramienta*.

Fig. 3. Universo de salida *Tiempo_ Sin Herramienta*.

A modo ilustrativo, la Figura 2 muestra la representación del universo de entrada *Movilidad_ Sin Herramienta* y la Figura 3 el correspondiente universo de salida *Tiempo_ Sin Herramienta*. Las figuras análogas para Bastón, Andadera y Silla de ruedas mantienen la misma estructura, con sus respectivos ajustes en las varianzas y centros para representar la heterogeneidad particular de cada grupo.

3.6 Base de reglas

La base de conocimiento se compuso de cinco reglas difusas, formuladas para representar la relación inversa entre la movilidad del usuario y el tiempo de servicio estimado, estableciendo una correspondencia directa entre los conjuntos definidos en los universos de entrada y salida.

- Si Movilidad es Muy Baja, entonces Tiempo es Muy Largo.
- Si Movilidad es Baja, entonces Tiempo es Largo.
- Si Movilidad es Media, entonces Tiempo es Regular.
- Si Movilidad es Alta, entonces Tiempo es Corto.
- Si Movilidad es Muy Alta, entonces Tiempo es Muy Corto.

3.7 Formulación de inferencia difusa tipo Singleton

El proceso de inferencia empleado en el modelo para cada uno de los sistemas FIS desarrollados se basa en una estructura de tipo *Singleton*, derivada del método de Mamdani. Esta configuración conserva la lógica de evaluación difusa tradicional, pero simplifica el cálculo del valor de salida al sustituir los consecuentes por puntos representativos. De esta forma se mantiene una relación continua y coherente entre la variable de entrada (*Movilidad*) y la variable de salida (*Tiempo*), siguiendo las etapas clásicas de fuzzificación, evaluación de reglas, implicación, agregación y defuzzificación.

Fuzzificación En esta etapa, el valor numérico de entrada x se transforma en grados de pertenencia mediante la función gaussiana previamente definida en la Ecuación (1), utilizando los parámetros c y σ establecidos para cada conjunto lingüístico. El resultado es un vector de afinidades que describe la contribución de cada término de *Movilidad* al proceso inferencial.

Evaluación e implicación de reglas Cada sistema cuenta con un conjunto de cinco reglas de la forma:

$$R_i : \text{Si Movilidad es } A_i, \text{ entonces Tiempo es } B_i \qquad (2)$$

El grado de activación α_i de cada regla se calcula como:

$$\alpha_i = \mu_{A_i}(x) \qquad (3)$$

y se utiliza para recortar el consecuente asociado mediante la operación de mínimo:

$$\mu_{B_i'}(y) = \min\{\alpha_i, \mu_{B_i}(y)\} \qquad (4)$$

Cada regla genera así un conjunto de salida recortado que refleja su contribución individual al universo *Tiempo*. La Figura 4 muestra un ejemplo gráfico del proceso de implicación en el sistema correspondiente a la Andadera.

Fig. 4. Proceso de implicación difusa en el sistema correspondiente a la Andadera.

Agregación y defuzzificación Los conjuntos recortados se combinan aplicando la operación de máximo:

$$\mu_B(y) = \max_i \{\mu_{B_i'}(y)\} \tag{5}$$

El conjunto resultante representa la salida difusa agregada, sobre la cual se aplica el método del centroide para obtener el valor *crisp* de salida:

$$\hat{y} = \frac{\int y\, \mu_B(y)\, dy}{\int \mu_B(y)\, dy} \tag{6}$$

Este procedimiento garantiza resultados continuos y estables, evitando saltos abruptos y proporcionando una representación realista del comportamiento del sistema ante variaciones graduales en la movilidad. La Figura 5 ilustra el conjunto agregado y el valor defuzzificado correspondiente.

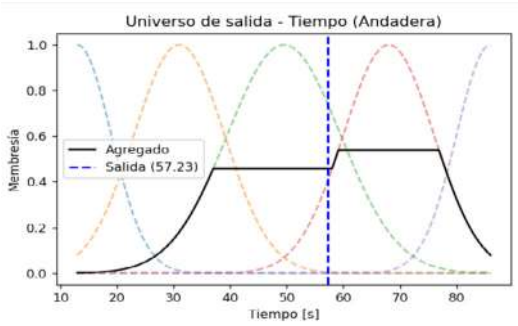


Fig. 5. Conjunto de salida agregado y valor defuzzificado obtenido mediante el método del centroide.

Síntesis del proceso El flujo completo del proceso de inferencia difusa se resume en las siguientes etapas:

- **Fuzzificación:** conversión del valor numérico de entrada en grados de pertenencia.
- **Disparo:** activación de reglas en función de los grados de pertenencia obtenidos.
- **Implicación:** recorte de los conjuntos de salida según el nivel de activación.
- **Agregación:** combinación de las salidas parciales en un único conjunto difuso.
- **Defuzzificación:** cálculo del valor numérico final mediante el método del centroide.

3.8 Implementación del modelo

El modelo difuso fue inicialmente desarrollado en *Microsoft Excel* para verificar la coherencia de las reglas y los rangos de los universos de discurso. Posteriormente se migró a *Python* para automatizar el proceso y mejorar la precisión de los cálculos, utilizando las librerías `NumPy` y `Matplotlib` para el manejo numérico y la visualización de los universos de entrada y salida, asi como los pronosticos resultantes, permitiendo reutilizarlo en el sistema DARP.

4. RESULTADOS

4.1 Pruebas del modelo

Con el propósito de probar el comportamiento del modelo propuesto, se realizó una comparación directa entre los tiempos estimados por los sistemas FIS y los valores observados en campo. Para cada grupo de usuarios se seleccionaron 15 casos representativos que cubren distintos grados de movilidad. Las Tablas 4 a 7 presentan los resultados obtenidos, incluyendo el error absoluto (EA) y el error relativo (ER %), definidos como:

$$EA = |y_i - \hat{y}_i| \tag{7}$$

$$ER\% = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100 \tag{8}$$

Table 4. Comparación de tiempos observados y estimados – Sin herramienta

Movilidad	Tiempo	Pronóstico	EA	ER%
7	10.75	11.15	0.40	3.70
8	9.21	9.42	0.21	2.26
7	11.39	11.15	0.24	2.13
2	21.80	21.55	0.25	1.15
6	12.49	13.95	1.46	11.67
5	15.76	16.05	0.29	1.85
3	18.40	20.58	2.18	11.86
9	7.54	8.45	0.91	12.09
6	12.49	13.95	1.46	11.67
7	10.77	11.15	0.38	3.50
2	20.68	21.55	0.87	4.20
6	13.79	13.95	0.16	1.14
2	20.61	21.55	0.94	4.55
7	11.24	11.15	0.09	0.82
6	12.72	13.95	1.23	9.65

Resultados por grupo En el grupo *Sin herramientas*, el modelo mostró una correspondencia casi lineal con los datos experimentales, manteniendo un error relativo promedio inferior al 10 %. Esto evidencia una alta estabilidad y un ajuste preciso del patrón decreciente del *dwell time* conforme aumenta el grado de movilidad.

Para el grupo Bastón, los resultados presentan ligeras sobreestimaciones en niveles medios de movilidad; sin embargo, el error absoluto promedio se mantuvo dentro de un margen operativo aceptable (< 3 s), reproduciendo adecuadamente el incremento progresivo del tiempo al disminuir la movilidad.

Table 5. Comparación de tiempos observados y estimados – Con herramienta: Bastón.

Movilidad	Tiempo	Pronóstico	EA	ER%
7	23.27	24.605	1.335	5.737
9	15.86	17.988	2.128	13.416
3	49.86	47.846	2.014	4.039
7	25.08	24.605	0.475	1.894
7	23.61	24.605	0.995	4.214
6	29.55	32.654	3.104	10.505
7	24.56	24.605	0.045	0.183
4	42.48	43.395	0.915	2.154
5	37.75	35.346	2.404	6.369
6	33.50	32.654	0.846	2.524
6	32.90	32.654	0.246	0.747
6	29.34	32.654	3.314	11.296
4	44.20	43.395	0.805	1.821
6	32.90	32.654	0.246	0.747
6	32.14	32.654	0.514	1.600

Table 6. Comparación de tiempos observados y estimados – Con herramienta: Andadera.

Movilidad	Tiempo	Pronóstico	EA	ER%
9	23.52	30.767	7.247	30.811
9	24.81	30.767	5.957	24.010
7	38.00	41.768	3.768	9.916
10	15.56	22.525	6.965	44.760
5	48.30	50.563	2.263	4.685
7	38.59	41.768	3.178	8.235
3	63.79	63.997	0.207	0.324
8	32.66	35.003	2.343	7.174
7	34.42	41.768	7.348	21.348
5	50.28	50.563	0.283	0.563
6	47.00	48.437	1.437	3.057
1	85.12	76.475	8.645	10.156
8	29.86	35.003	5.143	17.224
9	24.81	30.767	5.957	24.010
10	13.80	22.525	8.725	63.223

Table 7. Comparación de tiempos observados y estimados – Con herramienta: Silla de ruedas.

Movilidad	Tiempo	Pronóstico	EA	ER%
10	28.25	36.148	7.898	27.958
1	163.32	144.997	18.323	11.219
7	72.16	68.587	3.573	4.952
3	119.20	125.206	6.006	5.038
8	55.91	56.668	0.758	1.357
8	59.98	56.668	3.312	5.521
6	83.74	87.577	3.837	4.582
1	157.76	144.997	12.763	8.090
2	144.10	131.788	12.312	8.544
1	158.74	144.997	13.743	8.658
6	80.27	87.577	7.307	9.103
6	88.80	87.577	1.223	1.377
4	109.96	113.307	3.347	3.044
2	143.87	131.788	12.082	8.398
2	144.10	131.788	12.312	8.544

En el grupo Andadera, se observó la mayor dispersión de errores, atribuible a la variabilidad inherente en las maniobras de ascenso y descenso, así como a las condiciones del usuario, ya que este grupo presentó múltiples escenarios, desde personas con discapacidad o adultos mayores que requieren apoyo. Aunque el error relativo alcanzó valores aislados superiores al 30 %, la tendencia general se mantuvo coherente con los registros empíricos, validando la consistencia del modelo para un rango amplio de condiciones físicas y contextuales.

Finalmente, en el grupo Silla de ruedas, los tiempos de servicio fueron significativamente más altos, con una ligera subestimación en los niveles más bajos de movilidad. Aun así, las diferencias promedio se mantuvieron dentro de límites aceptables, y la correlación entre tiempos observados y modelados se preservó, reflejando la alta sensibilidad del sistema ante condiciones de asistencia compleja.

Síntesis de desempeño En conjunto, los resultados muestran que los modelos difusos implementados reproducen de manera satisfactoria las tendencias observadas en campo, con errores relativos promedio inferiores al 12 % en los cuatro sistemas FIS. La estabilidad del modelo confirma la capacidad del enfoque difuso para representar la relación inversa entre la movilidad del usuario y el *dwell time* requerido, incluso bajo condiciones de alta variabilidad.

Los valores individuales de EA y ER % permiten además identificar diferencias entre grupos: mientras Sin herramienta y Bastón exhiben comportamientos casi deterministas, Andadera y Silla de ruedas evidencian la necesidad de incorporar factores contextuales adicionales —como la superficie, la asistencia o el espacio disponible— en futuras versiones del modelo.

4.2 Validación del modelo de inferencia difusa

Para evaluar el desempeño del modelo FIS global se analizó el grado de ajuste entre los tiempos estimados y las 250 muestras utilizadas como referencia para el modelado, considerando la variabilidad asociada al grado de movilidad y al uso de herramientas de apoyo.

Se aplicaron seis métricas estándar de evaluación predictiva: Error Absoluto Medio (MAE), que mide la magnitud promedio de los errores sin considerar su signo; Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), que penaliza con mayor peso los errores grandes; Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE), que expresa el error relativo en términos porcentuales; Error Medio (ME), que indica la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar; Error Máximo ($E_{\max}$), correspondiente a la mayor desviación individual entre los valores observados y estimados; y el Coeficiente de determinación (R^2), que cuantifica el grado de ajuste entre los valores predichos y los reales. Las métricas se definen formalmente en las Ecuaciones (9)–(13).

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i| \tag{9}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{10}$$

$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right| \tag{11}$$

$$ME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i) \tag{12}$$

$$E_{\max} = \max|y_i - \hat{y}_i| \tag{13}$$

Los resultados de validación se presentan en la Tabla 8, donde se observa un comportamiento general robusto del modelo difuso en los cuatro grupos analizados.

Table 8. Métricas de validación del modelo difuso.

Herram	**N**	**RMSE**	R^2	**MAPE**	**MAE**	**ME**	$E_{\max}$
Sin Herram	60	1.21	0.93	8.70%	0.92	-0.59	2.84
Bastón	85	2.69	0.93	10.58%	2.07	-0.29	8.55
Andadera	75	5.21	0.86	16.21%	4.59	-3.43	9.46
Silla	30	9.08	0.93	10.83%	7.24	2.44	18.87

Análisis de desempeño El coeficiente de determinación $R^2 \geq 0.86$ en todos los grupos confirma que el sistema reproduce adecuadamente la relación entre movilidad y tiempo de servicio, explicando la mayor parte de la variabilidad de los datos. El RMSE se mantiene por debajo de 10 s, lo que evidencia un error absoluto moderado y una estabilidad general del modelo; los valores más bajos se obtuvieron en *Sin herramienta* y *Bastón*, donde las condiciones operativas son más homogéneas.El MAE oscila entre 0.9 s y 7.2 s, mientras que el MAPE se sitúa entre 8 % y 16 %, rangos considerados aceptables para fenómenos con variabilidad humana.

El valor más alto de MAPE, correspondiente al grupo *Andadera* (16.21 %), se explica por la mayor dispersión de los tiempos observados, que resulta de factores contextuales no modelados, como el espacio disponible, las características del terreno, la asistencia externa o las condiciones físicas del paciente. Este último aspecto es especialmente relevante, dado que los otros grupos presentaron comportamientos más homogéneos, mientras que los usuarios de andadera abarcan desde personas con dificultad leve para caminar hasta individuos con movilidad muy reducida o ausencia de extremidad inferior, lo cual introduce una variabilidad intrínseca elevada. En contextos humanos de alta dispersión, los parámetros de error deben interpretarse considerando la naturaleza del fenómeno, más que aplicar umbrales estándar genéricos Tayman and Swanson (1999). Además, la ligera superposición de los conjuntos lingüísticos en niveles medios de movilidad podría contribuir a pequeñas desviaciones locales. Una vía de mejora futura consiste en refinar los parámetros σ, incrementando la resolución sin comprometer la interpretabilidad del sistema.

El Error Medio (ME) se mantiene próximo a cero, evidenciando ausencia de sesgo sistemático en las predicciones. Por su parte, el Error Máximo ($E_{\max}$), aunque más alto en *Silla de ruedas* (18.87 s), permanece dentro de límites coherentes con la amplitud natural de los datos, donde las maniobras de transferencia presentan alta variabilidad individual.

Síntesis global En conjunto, las métricas confirman la validez y estabilidad del modelo FIS, capaz de capturar de forma continua la relación inversa entre movilidad y *dwell time*. La estructura Mamdani–Singleton demostró ser adecuada para representar fenómenos con dispersión no lineal, permitiendo una estimación precisa y reproducible de los tiempos de servicio en contextos de transporte asistido.

4.3 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos confirman que el modelo de inferencia difusa (FIS) propuesto reproduce con alta fidelidad el comportamiento del *dwell time* registrado en los distintos grupos de usuarios. La tendencia observada coincide con el comportamiento observado inicialmente: a menor movilidad y mayor dependencia de la herramienta de apoyo, se presenta un incremento en el tiempo de ascenso o descenso. Los errores absolutos bajos y los coeficientes de determinación superiores a 0.86 validan la capacidad del modelo para representar adecuadamente la variabilidad del fenómeno.

Para evaluar su consistencia y comportamiento predictivo, se realizó una comparación con un modelo de regresión lineal ajustado por mínimos cuadrados, aplicado exclusivamente a los datos de prueba (15 observaciones por conjunto). Los resultados mostraron que la regresión alcanzó un desempeño ligeramente superior en los grupos de usuarios con mayor movilidad (*sin herramienta* y *bastón*), donde la relación entre el grado de movilidad y el tiempo de servicio tiende a ser más lineal. En cambio, el FIS mantuvo una mejor coherencia en los conjuntos con menor movilidad (*andadera* y *silla de ruedas*), donde los tiempos de ascenso y descenso presentaron una mayor dispersión y comportamientos no lineales.

Estos resultados sugieren que, bajo condiciones homogéneas, un modelo lineal simple puede aproximar con precisión la tendencia general del fenómeno; sin embargo, cuando las condiciones operativas se diversifican, el sistema difuso conserva su ventaja al representar transiciones graduales y variaciones no deterministas. En términos metodológicos, ambos enfoques son complementarios: la regresión lineal ofrece una referencia rápida y calibrable, mientras que el modelo difuso resulta más adecuado para escenarios con incertidumbre y heterogeneidad en el comportamiento observado.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio demostró que la aplicación de sistemas de inferencia difusa tipo Mamdani constituye una estrategia eficaz para estimar los tiempos de ascenso y descenso de personas con movilidad limitada, reproduciendo con buena fidelidad la variabilidad inherente al comportamiento humano que los métodos deterministas no pueden representar adecuadamente.

Los resultados de validación verifican el cumplimiento de los objetivos propuestos:

- La definición de universos de discurso y funciones de membresía a partir de datos observacionales permitió representar correctamente la dispersión de los tiempos.
- La implementación computacional en Python logró reproducir de manera continua y estable el comportamiento observado.

- La validación del modelo FIS para una posterior integración en un marco *Dial-a-Ride Problem* (DARP) para optimizar la programación temporal de servicios de transporte asistido.

En conjunto, el sistema propuesto ofrece una herramienta validada, interpretable y adaptable que mejora la estimación del *dwell time* en contextos de movilidad asistida, contribuyendo a una planificación más eficiente y equitativa del transporte orientado a personas con movilidad reducida.

6. LIMITACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Aunque los resultados obtenidos son satisfactorios, se reconocen limitaciones derivadas del alcance experimental del estudio. El modelo fue calibrado con datos provenientes exclusivamente de hospitales y centros médicos del municipio de Apizaco, Tlaxcala, por lo que su capacidad de generalización a otros contextos podría verse limitada, además de requerir una calibración más profunda.

Asimismo, no se incorporaron variables contextuales como el tipo de superficie, la asistencia de terceros o las condiciones del vehículo, las cuales podrían influir significativamente en el tiempo de servicio estimado.

En consecuencia, se proponen las siguientes líneas de trabajo futuro:

(1) Validación externa del modelo mediante su aplicación en otros municipios o instituciones con condiciones operativas diferentes.
(2) Ampliación del sistema de inferencia para incluir variables ambientales y contextuales que representen mejor la complejidad real del proceso.
(3) Integración del enfoque difuso con algoritmos heurísticos, con el fin de desarrollar esquemas de optimización dinámica de rutas que permitan ajustar los tiempos de servicio en tiempo real.

Estas acciones permitirán consolidar el sistema como una herramienta predictiva más generalizable y robusta, fortaleciendo su aplicación dentro de plataformas de gestión de transporte sanitario y movilidad inclusiva.

Finalmente, se plantea explorar en futuros trabajos la aplicación de otros métodos de predicción, como la regresión lineal y modelos de lógica difusa alternativos —por ejemplo, el enfoque de Tsukamoto—, con el objetivo de comparar su desempeño frente al modelo actual.

REFERENCES

ACNUDH (2025). El derecho a la salud: aspectos fundamentales e ideas erróneas comunes. Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos. URL `https://www.ohchr.org/es/health/right-health-key-aspects-and-common-misconceptions`. Consultado 2025-11-06.

Bautista-Arredondo, S., Vargas-Flores, A., Moreno-Aguilar, L.A., and Colchero, M.A. (2023). Utilización de servicios de salud en méxico: cascada de atención primaria en 2022. *Salud Pública de México*, 65(supl 1), S15–S22. doi:10.21149/14813.

de Apizaco, A. (2025). Gobierno de apizaco firma convenio con atah para apoyar a personas con insuficiencia renal y cáncer. URL `https://apizaco.gob.mx/noticias/noticia/2/`. Consultado 2025-11-06.

de Oriente, L.J. (2013). Ofrece el dif transporte a gente con discapacidad. URL `https://www.lajornadadeoriente.com.mx/tlaxcala/ofrece-el-dif-transporte-a-gente-con-discapacidad/`.

Garnier, C., Trépanier, M., and Morency, C. (2020). Adjusting dwell time for paratransit services. *Transportation Research Record*, 2674(9), 638–648. doi:10.1177/0361198120931099.

Kostyniuk, L.P. and D'Souza, C.R. (2020). Effect of passenger encumbrance and mobility aid use on dwell time variability in low-floor transit vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 132, 872–881. doi:10.1016/j.tra.2020.01.002.

Kuipers, R.A., van der Horst, A.R.A., Liang, X., and Mintsis, E. (2025). A naturalistic study into the flow of alighting and boarding passengers of commuter trains. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 31, 101369. doi:10.1016/j.trip.2025.101369.

Nasir, J.A., Sahar, S., Raza, H., Ahmad, N., and Ahmed, N. (2022). Clustering-based iterative heuristic framework for a non-emergency patients transportation problem. *ICT Express*, 8(4), 556–564. doi:10.1016/j.jth.2022.101411.

Naumov, V., Zaitseva, E., Levashenko, V., and Kvassay, M. (2021). Fuzzy-logic approach to estimate the passengers' preference when choosing a bus line within the public transport system. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*, 23(3), 124–134. doi:10.26552/com.C.2021.3.A150-A157.

Rahmani, A.M., Hosseinzadeh, M., Shojafar, M., and Taherizadeh, S. (2022). A q-learning and fuzzy logic-based hierarchical routing scheme in the intelligent transportation system for smart cities. *Mathematics*, 10(22), 4192. doi:10.3390/math10224192.

Tayman, J. and Swanson, D.A. (1999). On the validity of mape as a measure of population forecast accuracy. *Population Research and Policy Review*, 18(4), 299–322. doi:10.1023/A:1006166418051.

Tóth, M., Hajba, T., and Horváth, A. (2024). Milp models of a patient transportation problem. *Central European Journal of Operations Research*, 32(4), 903–922. doi:10.1007/s10100-023-00902-z.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Comparative Performance Analysis of Raspberry Pi Pico and ESP32 Microcontrollers under Single- and Multi-Core Processing Conditions.

Ortiz Carrasco Ciriaco, Rentería Manjarrez Rigoberto, Gaxiola Sánchez Omar Ivan.

Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán – Instituto Tecnológico de Culiacán

Juan de Dios Bátiz No. 310 Pte., Col. Guadalupe, C.P. 80220 Culiacán Rosales, Sin.

México (Tel: 667-454-0100; e-mail: m23171175@culiacan.tecnm.mx).

Abstract: This article presents a comparative analysis of the performance of the Raspberry Pi Pico and ESP32 microcontrollers, evaluating their behavior under single-core and multi-core processing conditions. Four progressively demanding tests were conducted, with the final stage incorporating both software and hardware components. The results show that parallel processing significantly improves the efficiency of both devices, especially in the case of the ESP32, due to its higher clock frequency and memory capacity Barr (2006) y Arm et al. (2022). This study provides a solid basis for selecting the most suitable platform for distributed IoT applications.

***Keywords*:** Multicore, IoT, Dual Core, parallel processing and embedded system

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de los sistemas embebidos y la Internet de las Cosas (IoT) ha incrementado la demanda de plataformas de bajo costo y alto rendimiento capaces de ejecutar procesos complejos y mantener comunicación inalámbrica constante entre múltiples dispositivos. Dentro de este contexto, microcontroladores como la Raspberry Pi Pico y el ESP32 se han posicionado como alternativas versátiles, eficientes y de fácil integración en aplicaciones distribuidas Embedded (2025) y Arm et al. (2022).

La elección de la plataforma adecuada depende de factores como la capacidad de procesamiento, la eficiencia en la ejecución de tareas secuenciales y paralelas, y la gestión de múltiples nodos interconectados, Hakim (2021). Este aspecto es esencial en redes inalámbricas, donde cada nodo debe procesar información localmente e intercambiar datos en tiempo real, Md Ziaul (2021). Recientes estudios han demostrado que el uso de FreeRTOS en ESP32 multicore permite mejorar la distribución de tareas entre núcleos, reduciendo la latencia de respuesta en aplicaciones concurrentes, Arm et al. (2022).

En este trabajo se presenta un análisis comparativo entre la Raspberry Pi Pico y el ESP32, evaluando su desempeño bajo distintas condiciones de operación, tanto en modo mononúcleo como multinúcleo, con el objetivo de caracterizar su comportamiento en procesos secuenciales y paralelos. Para ello, se desarrollaron cuatro pruebas experimentales con niveles progresivos de complejidad, integrando finalmente componentes de software y hardware.

Los resultados de este estudio proporcionan información clave para identificar la plataforma más adecuada en la implementación de sistemas embebidos, optimizando tanto la eficiencia del procesamiento como la escalabilidad del sistema, y contribuyendo al desarrollo de soluciones más robustas y eficientes para aplicaciones IoT. Asimismo, los avances tecnológicos en comunicaciones han generado nuevas demandas de conectividad y acceso a un número creciente de dispositivos. Entre estas innovaciones destacan las conexiones inalámbricas, que ofrecen importantes ventajas tecnológicas a un costo más accesible.

2. SISTEMAS EMBEBIDOS

Un sistema embebido es una solución tecnológica que integra hardware y software, diseñada para ejecutar funciones específicas dentro de un sistema más amplio, Lee et al. (2012). A diferencia de los sistemas de cómputo de propósito general, los sistemas embebidos están optimizados en cuanto a consumo de energía, tamaño, costo y recursos de procesamiento, lo que los hace particularmente adecuados para aplicaciones en las que la eficiencia es fundamental.

Estos sistemas suelen funcionar en tiempo real, lo que implica que deben procesar información y responder a eventos externos dentro de plazos estrictamente definidos para garantizar un desempeño fiable. Su hardware incluye microcontroladores, microprocesadores y diversos periféricos, mientras que su software consiste en firmware o programas desarrollados específicamente para el dispositivo en el que se implementan, ESRM (2025).

3. PROCESAMIENTO EN SERIE Y PARALELO

El rendimiento de un sistema embebido depende en gran medida de la forma en que se procesan las tareas, Embedded (2025).

3.1 Procesamiento secuencial (serie):

En el modelo de procesamiento secuencial, las tareas se ejecutan de manera consecutiva utilizando un único núcleo de

procesamiento (ver Figura 1). Si bien su implementación es relativamente simple, este enfoque puede generar cuellos de botella, especialmente en sistemas que deben gestionar múltiples procesos en tiempo real o en entornos con un alto volumen de intercambio de datos.

3.2 Procesamiento paralelo:

El procesamiento paralelo permite que las tareas se dividan y ejecuten simultáneamente en múltiples núcleos, optimizando la utilización de los recursos disponibles y reduciendo significativamente los tiempos de ejecución. Por ejemplo, el ESP32 incorpora dos núcleos, lo que le permite gestionar tareas concurrentes, mientras que la Raspberry Pi Pico también puede beneficiarse de la paralelización mediante programación adecuada. Esta estrategia facilita un diseño de software más estructurado, en el que cada núcleo ejecuta funciones específicas y bien definidas, mejorando la eficiencia general del sistema.

La eficiencia de cada modelo depende no solo del hardware, sino también de la optimización del software, del diseño de la arquitectura del sistema y de la naturaleza de las tareas a ejecutar. La Figura 1 proporciona una representación gráfica de los principios de funcionamiento de ambos enfoques de procesamiento.

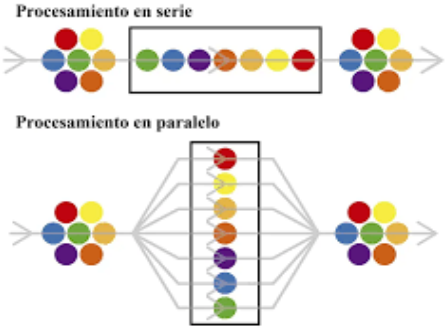


Figura 1. Procesamiento en serie y paralelo.

4. RASPBERRY PI PICO

La Raspberry Pi Pico es una tarjeta de desarrollo basada en el microcontrolador RP2040, diseñada y construida por los ingenieros de Raspberry Pi en 2021. Esta placa ha sido concebida como una plataforma de desarrollo flexible y de bajo costo. El RP2040 cuenta con dos núcleos ARM Cortex-M0+ que operan a 133 MHz, memoria Flash de 2 MB y memoria RAM de 264 KB. La Raspberry Pi Pico incorpora una fuente de alimentación conmutada (SMPS, Switch Mode Power Supply) tipo buck-boost, capaz de generar los 3.3 V necesarios para alimentar al RP2040 a partir de un rango de voltajes de entrada amplio, que va aproximadamente de 1.8 a 5.5 V.

De los 30 pines GPIO (General Purpose Input/Output) del microcontrolador RP2040, 26 están disponibles en los puntos de conexión de la Raspberry Pi Pico, mientras que los 4 restantes se destinan a funciones internas, como el control del LED integrado, la fuente de alimentación conmutada y la detección de voltajes del sistema, como se muestra en la Figura 2. Los pines de entrada y salida operan a 3.3 V, y 3 de ellos pueden configurarse como Convertidores Analógico-Digitales (ADC) según la información proporcionada por la Raspberry Pi Foundation, RPF (2025).

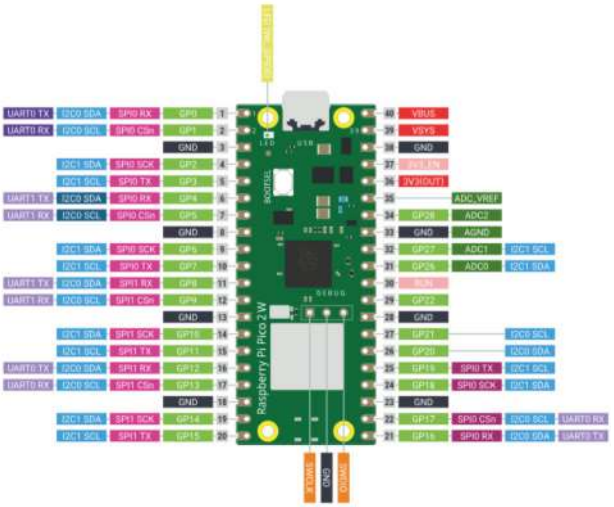


Figura 2. Diagrama de conexión de la Raspberry Pi Pico.

En 2022 la fundación lanzó una segunda versión denominada Raspberry Pi Pico W, que conserva las principales características del modelo original, como el microcontrolador RP2040, los 26 GPIO disponibles (Figura 3), la memoria Flash de 2 MB y la RAM de 264 KB, pero añade conectividad inalámbrica Wi-Fi 802.11 b/g/n gracias al chip Infineon CYW43439, ampliando significativamente sus capacidades para proyectos con conexión a Internet.

Ambas tarjetas cuentan con una interfaz de depuración Serial Wire Debug (SWD) de 3 pines, que se utiliza para programar y depurar el microcontrolador RP2040. Estos tres pines están suelen estar etiquetados como DEBUG.

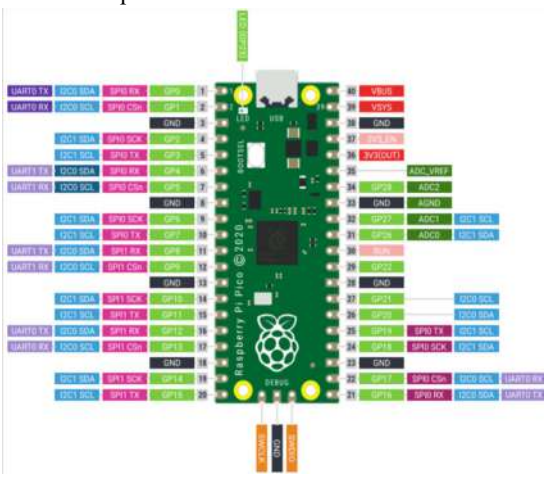


Figura 3. Diagrama de conexión de la Raspberry Pi Pico W.

5. ESP32

El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo y alto rendimiento diseñado por Espressif Systems en 2016, ideal para proyectos de IoT, domótica, electrónica y sistemas embebidos. Es el sucesor del ESP8266, pero mucho más potente.

El ESP32 tiene características destacadas como un subsistema de memoria combina 520 KB de SRAM interna con flash externa por QSPI; variantes WROVER añaden PSRAM (4–8 MB), útil para "buffers" grandes (audio, imagen, ML). La conectividad soporta Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth 4.2 con BLE, habilitando desde enlaces de alta tasa hasta topologías de bajo consumo. En E/S dispone de hasta 34 GPIO con ADC SAR de 12 bits, 2 DAC de 8 bits, controladores PWM (LEDC), interfaces SPI/I²C/UART/I²S, periféricos temporizados (RMT), contador de pulsos (PCNT), TWAI® (CAN 2.0) y MAC Ethernet en ciertos módulos, Espressif Systems (2025).

Figura 4. Módulo ESP32.

El microcontrolador ESP32 se integra dentro de un módulo (Figura 4), y este se monta sobre una placa de desarrollo para que los usuarios puedan programarlo, alimentarlo y conectarlo fácilmente a sensores, actuadores y otros componentes. La figura 5 muestra una placa de desarrollo comercial basada en el ESP32.

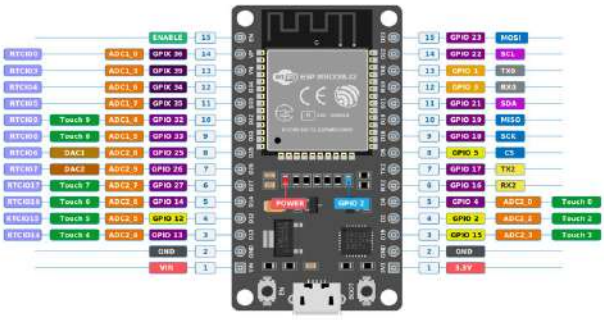


Figura 5. Diagrama de conexión del ESP32.

6. PROCESAMIENTO MULTINÚCLEO.

El ESP32 y el Raspberry Pi Pico son microcontroladores que cuentan con capacidad de procesamiento multinúcleo, aunque con diferencias significativas en arquitectura y uso. El ESP32 integra dos núcleos Xtensa LX6 que operan hasta 240 MHz cada uno, soportando multitarea avanzada gracias a un sistema operativo en tiempo real (FreeRTOS) integrado, lo que permite distribuir tareas entre núcleos, por ejemplo, asignando uno para gestión de conectividad Wi-Fi/Bluetooth y otro para la aplicación principal, ESDSP (2025). Por otro lado, el Raspberry Pi Pico utiliza dos núcleos ARM Cortex-M0+ a 133 MHz, con núcleos simétricos sin sistema operativo por defecto, requiriendo que el desarrollador gestione manualmente la ejecución concurrente mediante el SDK oficial. Esta configuración lo orienta hacia aplicaciones embebidas con tareas específicas y control directo, en contraste con el ESP32, que está diseñado para escenarios más complejos y con conectividad inalámbrica avanzada.

7. METODOLOGÍA

Para las pruebas de rendimiento de los dos microcontroladores se desarrollaron cuatro escenarios experimentales con niveles progresivos de complejidad, integrando en la prueba final elementos de software y hardware. Los algoritmos fueron equivalentes en ambos dispositivos para garantizar una comparación justa, RPF (2025) y Tabanelli et al. (2021).

El microcontrolador ESP32 fue programado en IDE de Arduino en su lenguaje de programación basado en C/C++. Para el microcontrolador Raspberry Pi Pico se utilizó el entorno de desarrollo Thonny con el lenguaje MicroPython.

Prueba 1:
Durante este experimento, ambos microcontroladores realizaron la tarea de contar la cantidad de números primos en un rango de valores, incrementando progresivamente la cantidad de números para aumentar la carga de procesamiento. Las pruebas se ejecutaron utilizando un solo núcleo como empleando los dos núcleos disponibles en cada dispositivo, obteniendo los resultados plasmados en Figura 6 y Figura 7, donde se muestras las comparaciones de 1 y 2 núcleos en la Raspberry Pi Pico y el ESP32 respectivamente.

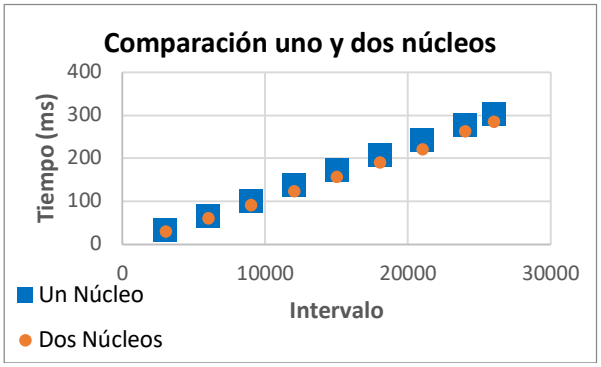


Figura 6. Comparación del procesamiento de un solo núcleo y de doble núcleo para el cálculo de números primos utilizando Raspberry Pi Pico.

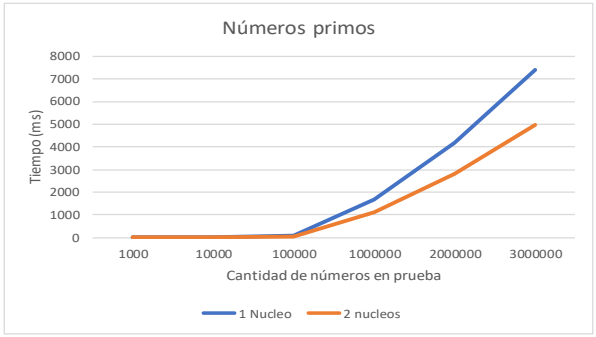


Figura 7. Comparación del procesamiento de un solo núcleo y de doble núcleo para el cálculo de números primos utilizando ESP32.

En el microcontrolador ESP32, la eficiencia en el uso de los

dos núcleos se hizo más evidente cuando el universo de búsqueda superó los 100,000 números. En contraste, en la Raspberry Pi Pico el rendimiento se mantuvo prácticamente constante, debido a que el universo de búsqueda máximo permitido fue inferior a 30,000 números.

Prueba 2:
El segundo experimento consistió en evaluar el desempeño de los microcontroladores mediante un programa que genera una matriz cuadrada cuyo tamaño es especificado por el usuario. La matriz se llena con números enteros aleatorios cuyo rango va de 0 hasta 50. La función del programa consiste en seleccionar el número ubicado en la posición (0,0) y buscarlo a lo largo de toda la matriz para determinar cuántas veces se repite.

Esta operación se realizó con matrices de distintos tamaños, con el objetivo de analizar cómo varía el rendimiento y el tiempo de procesamiento a medida que aumenta la carga de trabajo. Como se observa en la Figura 8 y Figura 9, se presentan los resultados tanto en procesamiento secuencial como en paralelo, mostrando cómo cambia el comportamiento en función del tamaño de la matriz.

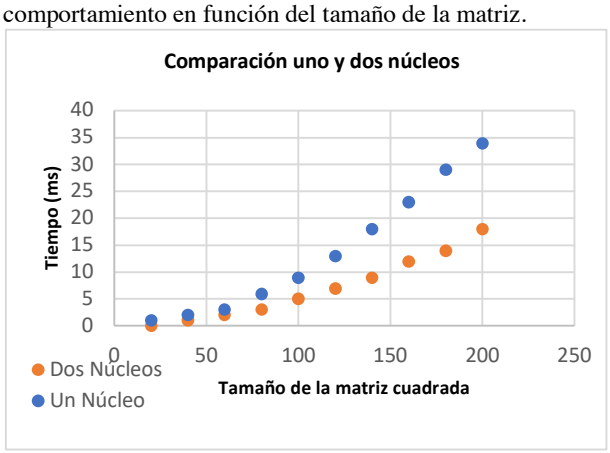


Figura 8. Comparación del procesamiento de uno y dos núcleos para la búsqueda repetida de un número en la posición (0,0) en una matriz utilizando Raspberry Pi Pico.

Figura 9. Comparación del procesamiento de uno y dos núcleos para la búsqueda repetida de un número en la posición (0,0) en una matriz utilizando ESP32.

Le mejora en el desempeño en ambos microcontroladores fue mejor al emplear los dos núcleos como se ve en las gráficas de los resutlados. De nueva cuenta que el universo de búsqueda que permitío el Raspberry Pi Pico fue menor que el ESP 32. El Raspberry Pi Pico apenas supero matrices cuadradas de tamaño 200, mientras que el ESP32 lo hizo con matrices de tamaño 20,000.

Prueba 3:
El tercer experimento se enfocó en analizar el rendimiento de los microcontroladores mediante un código que inicialmente genera una matriz con números aleatorios de tamaño definido por el usuario como la prueba 2, la cual posteriormente se convierte en un vector unidimensional. El programa toma el número ubicado en la posición (0,0) y realiza una búsqueda a lo largo de todo el vector para determinar cuántas veces se repite. Esta prueba se llevó a cabo con matrices de distintos tamaños con el objetivo de evaluar cómo varían el tiempo de ejecución y la eficiencia de los microcontroladores a medida que se incrementa la carga de procesamiento, obteniendo los datos de la Figura 10 y Figura 11.

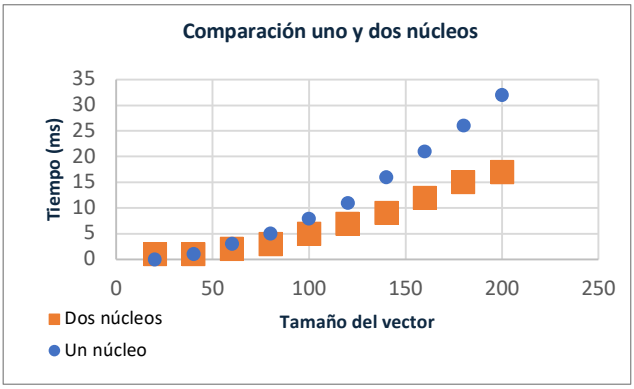


Figura 10. Comparación del procesamiento de un núcleo y de dos núcleos para la búsqueda repetida de un número en la posición (0,0) en un vector utilizando Raspberry Pi Pico.

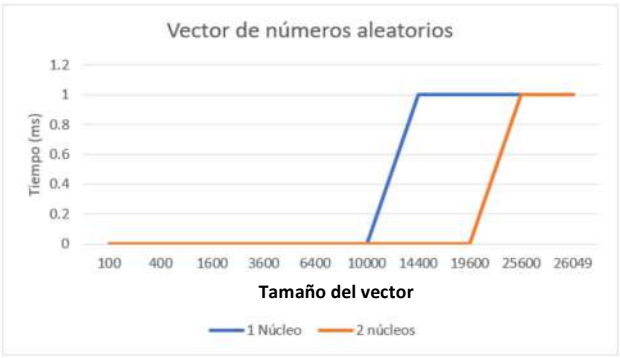


Figura 11. Comparación del procesamiento de un núcleo y de dos núcleos para la búsqueda repetida de un número en la posición (0,0) en un vector utilizando ESP32.

Prueba 4:
La última prueba realizada tuvo como propósito evaluar el rendimiento integral del sistema distribuido, considerando tanto la latencia de comunicación inalámbrica mediante Zigbee como la capacidad de procesamiento concurrente de los microcontroladores empleados (Raspberry Pi Pico y ESP32). Para ello, se diseñó un experimento compuesto por dos circuitos interconectados de manera inalámbrica, en donde cada dispositivo cumple una función específica pero

sincronizada.
El primer circuito incorpora un pulsador utilizado para iniciar la rutina de prueba. Al ser presionado, se ejecutan simultáneamente dos procesos: el inicio de un temporizador en el microcontrolador maestro y el envío de una señal de activación al segundo circuito a través del enlace Zigbee. El segundo circuito recibe dicha señal e inmediatamente activa un servomotor, el cual realiza un desplazamiento angular controlado hasta que la palanca acoplada cruza la línea de detección del sensor infrarrojo. Cuando esto ocurre, el sensor genera una señal de retroalimentación que es enviada de regreso al circuito maestro, lo que provoca la detención del temporizador y permite calcular con precisión el tiempo total de respuesta del sistema.
Este tiempo de respuesta integra dos componentes fundamentales:

- Tiempo de transmisión y reacción inicial: desde que se presiona el pulsador hasta que la señal de activación es procesada por el segundo circuito.

- Tiempo de detección del sensor: desde la activación del servomotor hasta que el sensor infrarrojo detecta el movimiento y transmite la señal de confirmación.

El tiempo de desplazamiento del servomotor se considera constante y despreciable en variación, de modo que las fluctuaciones observadas se deben principalmente al retraso en la detección del sensor y a la latencia de comunicación Zigbee. Estos factores dependen directamente de la carga de procesamiento del microcontrolador en el momento de la ejecución.

Durante esta última prueba, el sistema ejecutó en paralelo el cálculo de números primos, con el objetivo de simular un entorno de carga computacional real y analizar cómo la ejecución de tareas de cálculo intensivo afecta la respuesta del hardware. De esta forma, se pudo observar la interacción entre el rendimiento del procesador, la eficiencia de la comunicación inalámbrica y la respuesta física del sistema mecánico.

Al presionar el pulsador del primer circuito, se ejecutan simultáneamente dos acciones: se inicia un temporizador y se transmite la señal de activación al segundo circuito mediante el módulo Zigbee. A continuación, el segundo circuito activa el servomotor, provocando que la palanca asociada se desplace frente al sensor infrarrojo. Una vez que el sensor detecta el movimiento de la palanca, envía una señal de retroalimentación al primer circuito indicando que la acción del servomotor se ha completado. En ese momento se detiene el temporizador, obteniéndose así el tiempo de respuesta del sistema.

Es importante considerar que este tiempo de respuesta considera dos tiempos, el tiempo que tarda el sistema en detectar el pulsador y enviar la señal al segundo circuito; y el tiempo que tarda el sensor en detectar la palanca del servomotor y enviar la señal al primer circuito. El tiempo de respuesta del motor es prácticamente constante, lo que varía es el tiempo que tarde el sensor en detectar que se movió el motor porque este atendiendo otras tareas del código.

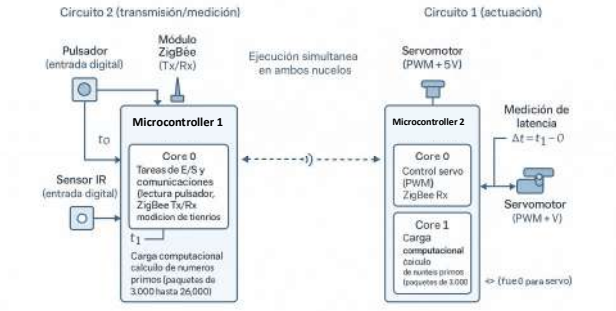


Figura 12. Diagrama de bloques del funcionamiento del circuito utilizado para observar el rendimiento del software y del hardware entre uno y dos núcleos.

De manera simultánea, el sistema ejecutaba el cálculo de números primos en intervalos definidos de la prueba 1, con el fin de evaluar el desempeño de procesamiento durante la operación concurrente de hardware y cálculo como lo muestra el diagrama de la Figura 12. Los datos obtenidos se muestran en la Figura 13 y Figura 14.

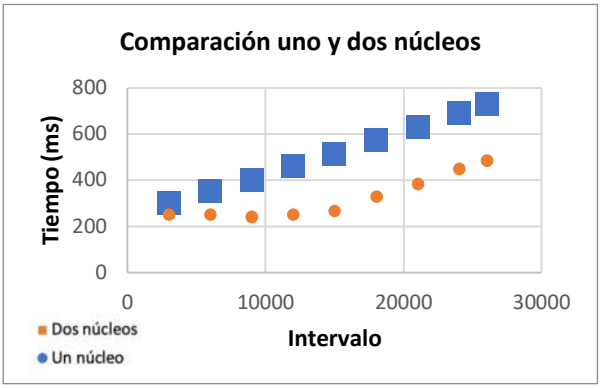


Figura 13. Comparación del rendimiento en procesos de software y hardware utilizando Raspberry Pi Pico con uno y dos núcleos.

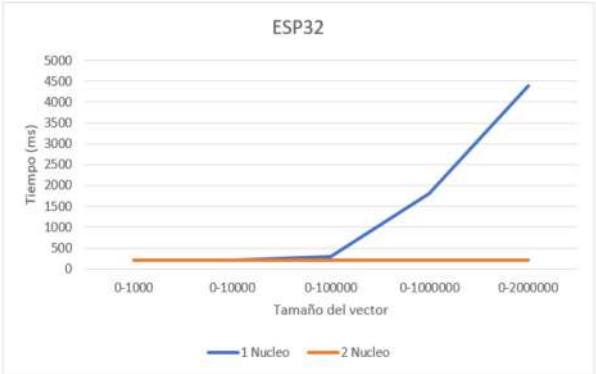


Figura 14. Comparación del rendimiento en procesos de software y hardware utilizando uno y dos núcleos en ESP32.

8. ANALISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados experimentales revela una mejora constante en el rendimiento de ambos microcontroladores al

emplear procesamiento paralelo. En todos los escenarios, el uso de dos núcleos permitió reducir significativamente los tiempos de ejecución frente al procesamiento secuencial, evidenciando una mayor eficiencia en la distribución de tareas.

El ESP32 mostró un comportamiento superior a la Raspberry Pi Pico en las pruebas de mayor carga computacional, lo que se atribuye a que su frecuencia de trabajo es mayor, mayor capacidad de memoria RAM y la integración de FreeRTOS, que facilita la gestión de tareas concurrentes entre núcleos. Esta ventaja se hizo especialmente evidente a medida que los algoritmos incrementaron su complejidad, particularmente en el procesamiento de grandes conjuntos de datos y en la ejecución simultánea de procesos de comunicación y control de actuadores.

Por su parte, la Raspberry Pi Pico mantuvo un desempeño estable en las pruebas con menor carga, demostrando ser una plataforma eficiente y de bajo consumo para aplicaciones que no requieren procesamiento intensivo. Aunque su arquitectura dual-core también ofreció mejoras al dividir las tareas, la ausencia de un sistema operativo en tiempo real limitó su aprovechamiento completo del paralelismo.

En la última prueba, que integró procesamiento de datos, comunicación inalámbrica y respuesta de hardware, se observó una reducción notable en la latencia total del sistema al emplear el procesamiento multinúcleo. Esto confirma que la ejecución paralela no solo mejora el rendimiento computacional, sino también la capacidad de respuesta en aplicaciones embebidas que combinan software, sensores y actuadores en tiempo real.

En conjunto, los resultados demuestran que el procesamiento paralelo incrementa la eficiencia general de los sistemas embebidos, optimizando tanto la velocidad de ejecución como la sincronización entre procesos, y evidenciando diferencias claras en las capacidades de ambas plataformas bajo condiciones equivalentes.

9. CONCLUSIÓN

Los resultados de este estudio confirman que la implementación del procesamiento paralelo en microcontroladores embebidos ofrece ventajas sustanciales en tiempo de ejecución, eficiencia energética y capacidad de respuesta. El uso de múltiples núcleos permite una asignación más equilibrada de las tareas, reduciendo los cuellos de botella típicos del procesamiento secuencial y mejorando la estabilidad del sistema bajo cargas de trabajo exigentes.

El ESP32 sobresale como la opción más robusta para aplicaciones que demandan multitarea, conectividad inalámbrica y alto rendimiento, gracias a su arquitectura avanzada y soporte nativo para FreeRTOS. En contraste, la Raspberry Pi Pico representa una alternativa adecuada para proyectos de bajo costo, menor consumo energético y tareas de control específicas, donde la simplicidad y eficiencia son prioritarias.

En términos generales, se concluye que la elección entre ambas plataformas debe basarse en los requerimientos de complejidad, conectividad y escalabilidad del proyecto. Este análisis proporciona una base sólida para el diseño de sistemas IoT distribuidos, donde el equilibrio entre potencia de cómputo, costo y eficiencia resulta determinante para el desarrollo de soluciones embebidas modernas y sostenibles.

10. REFERENCIAS

Barr M. and Massa A. (2006). *Programming Embedded Systems: With C and GNU Development Tool*s, 2nd ed., O'Reilly Media, 2006.

Embedded staff. [En línea]. *Putting multicore processing in context: Part one*. Disponible en: https://www.embedded.com/putting-multicore-processing-in-context-part-one. [Último acceso: 24 09 2025]

(RPF), Raspberry Pi Foundation. [En línea]. *Raspberry Pi Pico Datasheet*. [En línea]. Disponible en: https://datasheets.raspberrypi.com/pico/picodatasheet.pdf. [Último acceso: 28 09 2025].

Espressif Systems. [En línea]. *ESP32 Technical Reference Manual*. Disponible en: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf. [Último acceso: 2 10 2025].

Arm J., Baštán O., Mihálik O. and Bradáč Z. (2022) *Measuring the Performance of FreeRTOS on ESP32 Multi-Core*, IFAC-PapersOnLine, vol. 55, no. 4, pp. 292-297, Jul. 2022.

Md Ziaul Haque Zim. (2021). *"TinyML: Analysis of Xtensa LX6 microprocessor for Neural Network Applications by ESP32 SoC,* arXiv preprint arXiv:2106.10652, Jun. 2021.

Tabanelli E. Tagliavini G. and Benini L. (2021). *DNN is not all you need: Parallelizing Non-Neural ML Algorithms on Ultra-Low-Power IoT Processors*, arXiv preprint arXiv:2107.09448, Jul. 2021.

Hakim G. P. N., Hajar M. H. I., Firdausi A. and Ramadhan E., *Benchmarking in Microcontroller Development Board Power Consumption for Low Power IoT WSN Application*, Jurnal Teknologi Elektro, 2021.

(ESDSP), Espressif Systems, [En línea]. *Espressif DSP Library Benchmarks*. Documentation, Espressif. Disponible en: https://docs.espressif.com/projects/esp-dsp/en/latest/esp-dsp-benchmarks.html. [Último acceso: 3 08 2025].

(ESRM), Espressif Systems, [En línea]. *Espressif reference manual*. Documentation, Espressif. Disponible en: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf. [Último acceso: 15 08 2025].

Lee E. A. and Messerschmitt D. G. (2012). *An Introduction to Embedded Systems: Interfacing to the Freescale*. 2nd ed., Cambridge, MA: MIT Press, 2012.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Compy: Intelligent Wearable System for Assisted Navigation in Visually Impaired Individuals

Ahuelican Dorantes, Erick Aldair *, Lozano Rendón, Brayan De Jesús *, Navarrete Ambrosio Oswaldo *, Paula Iglesias, Abraham *, Garibay Campos, Leo-Enver **, Hernández de la Cruz, Mercedes *

**Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Chilpancingo. Chilpancingo, Guerrero, México. (Tel: 747 2 10 14; e-mail: L21520502@chilpancingo.tecnm.mx , L21520525@chilpancingo.tecnm.mx , L21520531@chilpancingo.tecnm.mx , L21520533@chilpancingo.tecnm.mx , mercedes.hd@chilpancingo.tecnm.mx).*

***Centro Escolar Chilpancingo. Chilpancingo, Guerrero, México.*

(e-mail: leoenvergc@gmail.com)

Abstract: The main objective of this study was to develop a wearable system to help people with visual impairments. This system is based on an object detection model that uses convolutional neural networks, which were trained using a diverse and balanced dataset from both proprietary and public sources. An optimised YOLOv5 model was adapted alongside a voice synthesis system to provide auditory feedback. The results indicate that the model achieves 80% accuracy with an inference time of just 2 seconds, enabling the reliable identification of relevant objects in both indoor and outdoor environments. The auditory feedback provides users with a continuous, hands-free description of their surroundings and allows them to use other assistive aids concurrently, if they wish. The prototype, named Compy, is functional, ergonomic and more cost-effective than existing alternatives. It can be concluded that Compy promotes autonomy for visually impaired users and offers potential for improvement in future versions.

Keywords: Visually impaired people, wearable technology, artificial intelligence, object recognition, embedded system.

1. INTRODUCCION

Existen en el mundo más de 2,200 millones de casos de personas con deterioro de la visión cercana o lejana (WHO, 2023); como consecuencia de esta condición, su movilidad se ve limitada. La deficiencia visual ha impulsado el desarrollo de soluciones diferentes a las tradicionales. Aunque las herramientas como bastones o perros guía, son eficaces, no ofrecen información adicional en tiempo real sobre el entorno del usuario. Compy es un dispositivo vestible, háptico y entrenado con Inteligencia Artificial (IA) para facilitar la navegación de las personas, que integra los elementos de la Tecnología de Asistencia como la detección de obstáculos y la orientación continua (Velázquez-Guerrero *et al.*, 2021). El sistema se encuentra embebido en un prototipo de chaleco inteligente con un modelo entrenado para el reconocimiento de objetos. Este trabajo abarca desde el diseño hasta la construcción del *wereable,* así como los resultados de las pruebas realizadas, destacando la contribución de esta herramienta tecnología para mejorar la calidad de vida de los usuarios con problemas de visión reducida.

1.1 Antecedentes y Estado del Arte

El desarrollo de dispositivos auxiliares para la debilidad visual es un campo en evolución constante, pasando de herramientas mecánicas a sistemas electrónicos basados en IA (Palacios *et al.*, 2022). En este apartado se mencionan los trabajos más relevantes en el campo de la asistencia a la movilidad encontrados en la revisión de la literatura.

Avances en Detección de Objetos e IA. La clave para superar las limitaciones de los sensores simples reside en la aplicación de la Visión por Computadora y el Aprendizaje Profundo (*Deep Learning*). El uso de Redes Neuronales Convolucionales (CNN) ha permitido redefinir la tarea de detección de objetos, pasando de la clasificación manual de características a un proceso automatizado de aprendizaje (Velázquez *et al.*, 2023). Dentro de este campo, YOLO (*You Only Look Once*) se ha posicionado como el estándar para la detección en tiempo real debido a que reformula el problema de localización y clasificación en un solo paso de regresión, logrando un balance óptimo entre precisión y velocidad necesario para aplicaciones de asistencia a la movilidad (Rozada Raneros, 2021). Su versatilidad ha sido probada en diversos contextos, desde la detección de pistas aéreas ilegales hasta sistemas de seguridad para identificar armas (Erazo Yánez & Navarrete Cedillo, 2023; Schcolnik-Elias *et al.*, 2023).

Mobility of blind people using the smartphone's GPS and a wearable tactile display, es un sistema de orientación y guía para personas invidentes en entornos urbanos exteriores

(Velázquez-Guerrero et al.). Su objetivo es complementar las ayudas primarias como bastones blancos o perros guías, que no se descargan de la responsabilidad de detección de obstáculos. El dispositivo guía al usuario a un destino específico, por medio del GPS de un teléfono inteligente que obtiene las coordenadas de posicionamiento en tiempo real a través de un servidor en la nube y una computadora remota que ejecuta un GIS (OpenStreetMap y YOURS API), para obtener las instrucciones de navegación por la ruta óptima, codificadas como patrones de vibración en una Interfaz Podotáctil Vestible integrada al zapato, por lo que la interacción con las manos es reducida. Observa también, baja carga cognitiva debido a su interfaz intuitiva y rápida de entender. En experimentos adicionales con personas invidentes el sistema pudo guiarlos de manera eficiente a los destinos deseados sin interferir con su velocidad promedio de caminata. Otra ventaja es su portabilidad discreta al colocarse en el tobillo o zapato. Dentro de sus limitaciones destacan la dependencia de un teléfono móvil y componentes remotos como un servidor y computadora para el procesamiento de GIS; por otro lado, el GPS tiende a fallar cuando grandes estructuras civiles (edificios, muros) obstruyen la línea de visión con el satélite además de la inexactitud de coordenadas en aproximaciones de 2 a 5 metros.

Sistema IoT para asistir a personas invidentes - BLIND-NET es un dispositivo basado en visión cuya finalidad es asistir a personas invidentes en la navegación en entornos cerrados o interiores desconocidos, aprovechando los principios de la Industria 4.0 y el IoT (Bastidas and Díaz, 2021). Para la detección de obstáculos (mobiliario) y espacios seguros para caminar cuenta con una cámara RGBD ZED Mini. Una contribución importante es la transferencia de tecnologías y algoritmos, como el SLAM visual-inercial, de los vehículos autónomos para el diseño del sistema de asistencia. Dentro de las desventajas se encuentran los problemas de ergonomía y peso debido a que utiliza la tarjeta Jetson TX2 (un supercomputador portátil) para el procesamiento local, resultando en un equipo pesado y voluminoso que debe llevar la persona. Al ser probado en personas invidentes, los test de funcionamiento indican que los participantes sugirieron la necesidad de dispositivos más livianos y ergonómicos.

El objetivo de esta investigación es construir un sistema inteligente vestible para la navegación asistida en personas con limitaciones visuales. La alternativa que se plantea se denomina Compy; un chaleco inteligente, liviano, manos libres e independiente de aplicaciones u otros dispositivos móviles, que utiliza un sistema entrenado de visión por computadora para el reconocimiento de aproximadamente 80 categorías de objetos específicos como escaleras, puertas y personas, entre otros, en un rango mínimo de 0.5 metros y máximo de 5 metros lo que proporciona al usuario información contextualizada del espacio de navegación interior o exterior La implementación de la Raspberry Pi 4 embebido en una carcasa diseñada con tecnología 3D, permite la construcción de un sistema ergonómico, adaptable a personas de cualquier género o edad, de bajo costo constituyendo una solución práctica y accesible.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada para la construcción de Compy se muestra en la figura 1 y se describe a continuación:

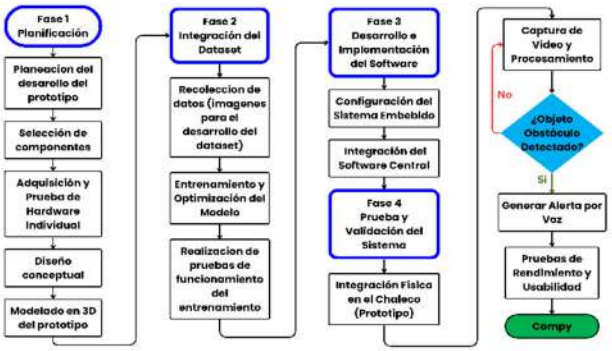


Figura. 1 Metodología para la construcción del sistema Compy.

2.1 Problemática detectada

La idea de construir un sistema vestible surge de observar, en Chilpancingo, personas con limitaciones visuales y ceguera total. En la ciudad capital del Estado de Guerrero, así como en muchas otras entidades del país, la falta de señalización y adaptaciones son inexistentes; este problema se agudiza si a la debilidad en la visión se suma la edad avanzada. Como se menciona en (Miranda, 2024), la indolencia de la sociedad y de las autoridades por adecuar espacios públicos para desplazarse, son los mayores obstáculos que enfrentan las personas invidentes.

2.2 Planificación

Considerando las dificultades de la persona entrevistada, durante sus travesías por lugares públicos, así como la falta de empatía de los habitantes, incluidos los servidores estatales. Se determinó que se necesitaba de un dispositivo inalámbrico, recargable, manos libres, independiente de aplicaciones externas, sin conexión a Internet que incluyera alertas de voz en tiempo real y ligero de peso. La ergonomía era otro factor importante, sin importar la edad, antropometría o género del posible usuario. Estas fueron las pautas que dieron lugar a la búsqueda y selección de los componentes más convenientes para la construcción del dispositivo; en cada uno de ellos se realizaron pruebas individuales para verificar su rendimiento. Una vez elegidas las partes se realizó el modelado 3D del prototipo.

2.3 Integración del dataset

Establecidas las 80 categorías a ser reconocidas por Compy, se buscó exhaustivamente en sitios web especializados en compartir datos para el entrenamiento del modelo. Uno de ellos es Kaggle, sitio para explorar, analizar y compartir datos de calidad. Adicional a las descargas, un 20% de las imágenes utilizadas fueron tomadas por el equipo de trabajo. Entre las clases consideradas se encuentran animales, vehículos, enseres domésticos, mobiliario, peatones, baches, escaleras, y otros obstáculos/objetos encontrados comúnmente en espacios habitables. Durante esta etapa se cuidó el balanceo adecuado de las clases para evitar los sesgos ocasionados por la subrepresentación o desequilibrio, situaciones que podrían

afectar el rendimiento del modelo. La limpieza a las imágenes propias se hizo con código de Python, de tal forma que solo se mostrara el objeto dentro de la imagen y no interfirieran otros objetos alrededor en el proceso de etiquetado, el contenido de los archivos se analizó minuciosamente con la finalidad de que cumplieran con las características necesarias descartando las que no.

2.4 Desarrollo e implementación del software

Para el desarrollo del software se implementó un modelo de detección basado en CNN, adaptada de YOLO, por su fortaleza para realizar procesos de localización y clasificación en un único paso de regresión, reduciendo considerablemente el tiempo de respuesta. Los resultados del modelo se integraron con un sistema de síntesis de voz que traduce la información visual en instrucciones auditivas, proporcionando al usuario una descripción del espacio donde se encuentra sin necesidad de interacción manual. La justificación de la elección de YOLO para usar en Compy, es su éxito en sistemas de detección de puertas o mascarillas utilizados en entornos reales, ya que un sistema de asistencia debe operar con la menor latencia posible (Abad Cutillas, 2024; Miranda-Ramos *et al.*, 2022).

El sistema se estructuró en torno a una Raspberry Pi 4, seleccionada por su tamaño compacto y rendimiento adecuado para la ejecución de algoritmos de IA en tiempo real. La detección visual se realiza con una cámara Raspberry Pi, configurada para la captura continua, mientras que la retroalimentación auditiva se integró a través de un módulo PAM8403 y una bocina de 4 ohmios y 3W, lo cual garantizó la generación de alertas claras y oportunas. La figura 2 muestra la disposición física de la Raspberry Pi, la cámara y los módulos de audio embebidos en la parte operativa del chaleco.

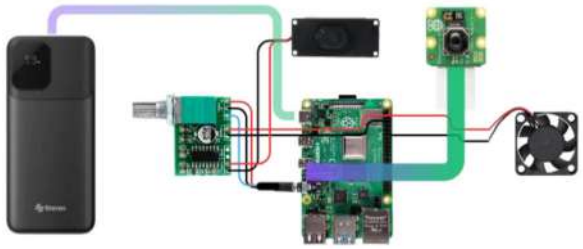


Figura. 2. Diagrama de bloques del sistema del chaleco inteligente.

El diagrama ilustra la interconexión de los componentes de hardware y el flujo de datos desde la cámara hasta la alerta de audio.

La tabla 1 contiene una comparativa de las características de las placas de desarrollo analizadas; como resultado de la revisión, se encontró que la Raspberry Pi 4 ofrece el equilibrio necesario para construir un dispositivo portátil de asistencia, que integre Visión Artificial. Su tamaño de 8 x 5 centímetros, considerablemente más pequeña que otras.

Tabla 1. Comparaciones de placas de desarrollo.

Criterio	Raspberry Pi 4 (8GB)	Raspberry Pi 5 (8GB)	NVIDIA Jetson Nano	LattePanda 3 Delta
CPU	Broadcom BCM2711 Quad-core Cortex-A72 @ 1.8 GHz	Broadcom BCM2712 Quad-core Cortex-A76 @ 2.4 GHz	Quad-core ARM Cortex-A57 @ 1.4 GHz	Intel Celeron N5105, Quad-core @ 2.9 GHz
GPU	VideoCore VI (500 MHz)	VideoCore VII (800 MHz)	128-core NVIDIA Maxwell	Intel UHD Graphics (800 MHz)
RAM	8GB LPDDR4	8GB LPDDR4X	4GB LPDDR4	8GB LPDDR4
Arquitectura	ARM	ARM	ARM	x86 (Comp. con Windows)
Conectividad	Gigabit Ethernet, Wi-Fi 5, Bluetooth 5.0	Gigabit Ethernet, Wi-Fi 6, Bluetooth 5.0	Gigabit Ethernet (sin Wi-Fi integrado)	Gigabit Ethernet, Wi-Fi 6, Bluetooth 5.2
Consumo de Energía	3-5W	5-10W	5-10W	15W
Precio aproximado	$2,100.00	$2,637.00	$10,000.00	$5,770.00

Como se observa en la tabla, la NVIDIA Jetson Nano, aunque es la opción más potente en términos de procesamiento gráfico gracias a su GPU de 128 núcleos Maxwell, resulta ser la alternativa más costosa (aproximadamente $10,000.00 MXN). Este alto precio va directamente en contra del objetivo de accesibilidad económica del chaleco Compy, cuyo plan de negocio busca ofrecer una solución asequible. Además, su consumo de energía (5-10W) es más elevado que el de la Raspberry Pi 4 en uso ligero.

Por otra parte, la LattePanda 3 Delta, con su arquitectura x86, ofrece una alta potencia de CPU, pero su consumo de energía es mayor (15W). Esta característica la descarta automáticamente para un dispositivo portátil que debe funcionar con batería durante periodos prolongados, pues afectaría completamente la autonomía del chaleco.

Finalmente, aunque la Raspberry Pi 5 ofrece mejoras en CPU y GPU respecto a la Pi 4, su mayor consumo energético (5-10W) y su precio superior (alrededor de $2,637.00 MXN) la

hacen menos atractiva que su predecesora para un proyecto donde la eficiencia energética y el costo mínimo son prioritarios.

2.5 Pruebas y validación del sistema

Todos los componentes fueron ensamblados en un chaleco de material elástico, lo que favoreció la ergonomía, la movilidad y la adaptabilidad del sistema.

El prototipo fue sometido a una fase de validación experimental orientada a comprobar su funcionalidad y desempeño bajo condiciones representativas. Se realizaron pruebas en entornos controlados y simulados, lo que permitió verificar tanto la precisión de detección como la latencia promedio entre el reconocimiento del objeto y la emisión de la alerta auditiva, alcanzando valores adecuados para la asistencia en movilidad (Tabla 2).

Tabla 2. Indicadores de rendimiento

Indicador de rendimiento	Valor obtenido	Unidades
Tasa de Detección de Objetos	88	%
Latencia Promedio del Sistema	1.0 – 2.0	Segundos
Autonomía de Batería	6 – 8	Horas
Distancia Mínima de Detección	0.5	Metros

Paralelamente, se evaluó la autonomía energética mediante estimaciones teóricas de consumo y pruebas de uso continuo, constatando que la duración de la batería superó las predicciones iniciales, lo cual evidenció la eficiencia del diseño. Asimismo, la fase de validación permitió identificar áreas susceptibles de optimización, entre ellas la mejora de la detección en condiciones de baja luminosidad y el seguimiento de objetos en movimiento rápido, aspectos que constituyen líneas de trabajo futuro.

Se realizaron estimaciones teóricas y verificaciones experimentales de la autonomía del prototipo alimentado por una powerbank de 20 000 mAh (3.7 V) (Ec.1). Los cálculos teóricos, bajo supuestos representativos de consumo, proyectaron una autonomía en el rango de 3.9–8.6 h según el perfil de carga. En contraparte, la medición de campo mostró que tras 6–8 h de operación continua la batería había consumido aproximadamente el 50 % de su capacidad, lo que implica una autonomía práctica estimada de 12–16 h.

$C_{bat} = Capacidad\ de\ la\ bateria$
$V_{bat} = Voltaje\ de\ la\ bateria$
$E_{bat} = Energia\ de\ la\ bateria$
$E_{consumida} = Energia\ consumida$
$P_{med} = Potencia\ medida$
$t_{obs} = Total\ Observado$

(1)

$$C_{bat} = 20\,000\ mAh = 20.0\ Ah\ a\ V_{bat} = 3.7V$$
$$E_{bat} = C_{bat}\ x\ V_{bat} = 20.0\ Ah\ x\ 3.7\ V = 74.0\ Wh$$
$$E_{consumida} = 0.5\ x\ E_{bat} = 0.5\ x\ 74.0\ Wh = 37.0\ Wh$$
$$P_{med}\ \frac{E_{consumida}}{t_{obs}} = \frac{37.0\ Wh}{t_{obs}(h)}$$
$$P_{med} = 6.17\ W$$
$$V_{sys} = 5\ V$$
$$I_{med} = \frac{P_{med}}{V_{sys}} \rightarrow I_{med} = 1.23\ A$$
$$t_{total} = \frac{E_{bat}}{P_{med}} = \frac{74.0\ Wh}{P_{med}} = 12\ horas\ aproximadamente$$

Este resultado experimental, sugiere un perfil de carga medio menor al asumido en el peor caso y destaca la importancia de complementar estimaciones teóricas con mediciones empíricas. Se incluyen en la Tabla 3 la comparación entre estimaciones y mediciones; la metodología de cálculo se describe en la sección Métodos.

Tabla 3. Mediciones teóricas y experimental.

Fuente estimada	Corriente total (A)	Potencia total (W)	Autonomía estimada (h)
Teórico bajo uso	**1.55**	**7.75**	**8.6**
Teórico – Operación típica	**2.15**	**10.75**	**6.2**
Teórico – pico de carga	**3.45**	**17.25**	**3.9**
Experimental – Powerbank al 50%	**1.23**	**6.17**	**12.0**

6. RESULTADOS OBTENIDOS

En la figura 3, se muestra el dispositivo Compy, confeccionado con materiales ergonómicos adaptables a cualquier antropometría. El sistema vestible se localiza en la parte frontal, al alcance de la mano, protegido por una carcasa diseñada e impresa en 3D, acorde a la disposición interna de los componentes.

Figura 3. Prototipo del chaleco inteligente Compy

Compy es una plataforma embebida inteligente conformada por una placa base Raspberry Pi 4 y un modelo entrenado para clasificar 80 categorías de objetos, incluidos obstáculos, animales e infraestructura urbana; una vez identificados, una señal sonora de advertencia indicando el nombre del elemento, es lanzada como salida en tiempo real. Dentro de sus ventajas se pueden mencionar las siguientes:

El sistema vestible es el resultado de la integración de algoritmos de visión por computadora en un dispositivo compacto (12 x 9 x 6 cms.), protegido con una carcasa a la medida, impermeable y fabricada con material resistente a golpes. La confiablidad alcanzada en el reconocimiento del objeto es del 85%; sin embargo, el error del 15% no afecta la inmediatez de las alertas auditivas por detección de un obstáculo, el usuario obtendrá la advertencia, propiciando una navegación reactiva, en comparación con las ayudas técnicas convencionales.

Con la arquitectura aplicada, se optimizó la relación entre eficiencia técnico-económica y costo-beneficio, lo que hace posible la viabilidad comercial del producto resultante por ser accesible y competitivo. Por todo lo anterior, Compy puede ser relevante en el campo de las tecnologías vestibles aplicadas a la asistencia social, constituyéndose en una solución innovadora y funcional con el propósito de facilitar la locomoción de personas con debilidad visual.

6. CONCLUSIONES

Construir un sistema vestible de asistencia tiene especial importancia porque su uso, devuelve a los usuarios de edad avanzada, cierto grado de autonomía para caminar y realizar sus actividades cotidianas; al mismo tiempo, puede generar confianza en los familiares al contar con un dispositivo inteligente con reconocimiento de objetos y retroalimentación por voz, que indique a las personas con debilidad visual o ceguera, los objetos existentes en el entorno.

En una sociedad con las exigencias actuales, Compy puede adaptarse para efectuar ciertas actividades, de este modo, personas con poca o nula visión, pueden sentirse útiles al ser contratadas y remuneradas, devolviéndoles su autoestima.

Más allá de consolidar el diseño actual, esta investigación es el principio de un trabajo orientado a incrementar la certeza del dispositivo inteligente en escenarios operativos adversos, como casos de sordomudez, la detección de objetos en movimiento a alta velocidad o desconocidos, así como la inmediata comunicación a un teléfono móvil registrado para recibir notificaciones en caso de emergencias.

Aunque Compy puede considerarse ligero en su peso, también, se trabaja para conseguir una versión más pequeña y precisa.

REFERENCIAS

Abad Cutillas, D. (2024). *Sistema de detección de puertas mediante visión artificial*. Tesis de [Grado/Máster/Doctorado/Especifique, si se sabe], Universidad [Indicar si se conoce]. Disponible en: http://hdl.handle.net/10045/146798

Barber, L. (2019). Las lesiones oculares producidas por caídas aumentan a medida que la población envejece, aunque suelen ser prevenibles. *American Academy of Ophthalmology*, 4 de febrero. Disponible en: https://www.aao.org/salud-ocular/noticias/mas-lesiones-oculares-en-los-mayores

Bastidas, S.C. and Díaz, A. (2021), "SISTEMA IoT PARA ASISTIR A PERSONAS INVIDENTES - BLIND-NET", *Encuentro Internacional de Educación En Ingeniería ACOFI 2017*, pp. 1–11, doi: 10.26507/ponencia.1756.

Erazo Yánez, C. P., & Navarrete Cedillo, G. A. (2023). Detección de pistas aéreas ilegales en imágenes digitales empleando técnicas de inteligencia artificial. Ciencia y Poder Aéreo, 18(1), 47-56. https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.758

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2024). *Estadísticas a propósito del Día Internacional de las Personas con Discapacidad*. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2024/EAP_PCD24.pdf

Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) (2021). *Caídas en personas adultas mayores*. Disponible en: https://www.insp.mx/avisos/caidas-en-personas-adultas-mayores

López-Sánchez, G.F., Ocampo-García, A. & Gallegos-García, C.E. (2019). Prevalencia y factores asociados a caídas en adultos mayores que viven en la comunidad. *Revista Española de Geriatría y Gerontología*, **54**(5), pp. 263-269. Disponible en: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6983699/

Autoridades y sociedad, el mayor obstáculo de las personas ciegas - El Sol de Acapulco | Noticias Locales, Policiacas, sobre México, Guerrero y el Mundo. (s. f.). https://oem.com.mx/elsoldeacapulco/tendencias/autoridades-y-sociedad-el-mayor-obstaculo-de-las-personas-ciegas-13349210

.

Miranda-Ramos, M.M., Hallon, J.O. & Suriaga, J.D. (2022). Sistema de cámaras para la detección de mascarillas con Python y Raspberry PI con comunicación inalámbrica a través del sistema global de comunicación móvil (GSM). *Información tecnológica*, **33**(3), pp. 23-30. Disponible en:https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642022000300023

World Health Organization: WHO. (2023, 10 agosto). *Ceguera y discapacidad visual*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment

Palacios, V.D.V., Torres, R.M. & Sánchez-Sánchez, A.S. (2022). Dispositivos auxiliares para la discapacidad visual. *Revista Digital Universitaria*, **23**(5). Disponible en: http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2022.23.5.1

ResearchGate (2019). *(PDF) Dispositivos de asistencia para la movilidad en personas con discapacidad visual: una revisión bibliográfica*. 29 de junio. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/334185545_Dispositivos_de_asistencia_para_la_movilidad_en_personas_con_discapacidad_visual_una_revision_bibliografica

Rozada Raneros, S. (2021). *Estudio de la arquitectura YOLO para la detección de objetos mediante deep learning*. Tesis de [Grado/Máster/Doctorado/Especifique, si se sabe], Universidad [Indicar si se conoce]. Disponible en: http://uvadoc.uva.es/handle/10324/45359

Sánchez-Méndez, D.L., Olguín-Medina, J.M. & Pérez-Cruz, Á. (2023). Prototipo de bastón inteligente para discapacidad visual. *RINDERESU*, **7**(1-2)

Schcolnik-Elias, A., Martínez-Díaz, S., Luna-Taylor, J.E. & Castro-Liera, I. (2023). Detección de armas tipo pistola mediante el uso de redes convolucionales con una arquitectura tipo YOLO y estereoscopía. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, **11**(Especial2), pp. 196–204. Disponible en: https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial2.10727

Trujillo Mora, V., González Jaimes, E.I., López Chau, A. & Bautista López, J. (2021). Análisis de la utilidad del Bastón Blanco Inteligente UAEM para personas con discapacidad visual. *RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, **11**(22), p. e045. Disponible en: https://doi.org/10.23913/ride.v11i22.897

Velázquez, M.Á.G., Chacon-Murguia, M.I. & Corral-Saenz, A.D. (2023). Revisión de Problemas en la Detección de Objetos en Imágenes y Videos Digitales. *ReCIBE. Revista electrónica de Computación, Informática, Biomédica y Electrónica*, **12**(1), pp. 1-43.

Velázquez-Guerrero, R., Pissaloux, E., Del-Valle-Soto, C., Carrasco-Zambrano, M.-Á., Mendoza-Andrade, A. and Varona-Salazar, J. (2021), "Mobility of blind people using the smartphone's GPS and a wearable tactile display", DYNA, Vol. 96 No. 1, pp. 98–104, doi: 10.6036/9635.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Diseño Automático de una Red Neuronal Funcional Simple

Antonio Aguilar-Patricio [0009-0005-7494-6995] *
Jorge L. De Jesus [0009-0005-7420-0704] *
Eddie Clemente [0000-0003-3195-9540] *
Alicia Martinez Rebollar [0000-0002-1071-8599] *

* *TecNM/Cenidet, Internado Palmira S/N, 62490 Cuernavaca, Morelos, Mexico. (e-mail: m25ce039@cenidet.tecnm.mx; d22ce048@cenidet.tecnm.mx; eddie.ct@cenidet.tecnm.mx; alicia.mr@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: This paper proposes an optimization of a simple functional neural network capable of inducing nonlinear decision boundaries with a single neuron. Multi-tree Genetic Programming synthesizes the scalar transformations $w_1(x_1)$, $w_2(x_2)$ and the output activation function. In the XOR case study, the method finds configurations with smooth saturating activations and complementary nonlinearities that achieve the desired behavior, reaching a minimum RMSE of 0.02834. The approach avoids backpropagation, preserves symbolic interpretability, and lays the groundwork for its evaluation on highly nonlinear problem sets.

Keywords: Functional Neural Networks, Genetic Programming, Radial Basis Function Networks.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, el término Perceptrón se refiere al algoritmo fundamental de una red neuronal artificial, para desarrollar clasificadores puramente lineales. A principios de la década de 1960, se propuso una versión generalizada de este algoritmo, en la que se introducía la función de activación en la neurona y se definía una analogía con la transmisión sináptica. Esta analogía se propuso como una función de las entradas y sus respectivos pesos, Bayat et al. (2017). Este concepto de una neurona simple con pesos ajustables y una función de activación no lineal sentó las bases para el desarrollo de las actuales Redes Neuronales Artificiales (ANN).

Si bien este modelo es eficaz para resolver problemas de clasificación lineal, las tareas contemporáneas de Aprendizaje Profundo (Deep Learning) requieren arquitecturas mucho más complejas, compuestas por múltiples capas de neuronas (DNN). La eficacia de las DNN en problemas no lineales se logra mediante el encadenamiento de neuronas y la introducción de funciones de activación no lineales. Sin embargo, esta complejidad introduce desafíos críticos. Para alcanzar la precisión deseada, las redes deben ser excesivamente robustas (con millones de pesos), que requieren un ajuste extensivo a través de algoritmos como la retro propagación. Este proceso de entrenamiento masivo demanda una cantidad considerable de recursos computacionales y tiempo, lo que representa una barrera significativa para la escalabilidad y accesibilidad de los modelos de vanguardia, Kamarthi and Pittner (1999).

En la actualidad, existen propuestas de redes neuronales que han sido diseñadas con el objetivo de optimizar o acelerar el proceso de entrenamiento y/o aprendizaje, ofreciendo una mayor capacidad de aproximación con menos nodos ocultos. Estos enfoques han modificando el modelo del perceptrón y sus componentes. Uno de estos enfoque son las Redes Neuronales Funcionales (RNF) que sustituyen los pesos de los enlaces por funciones neuronales internas. Estas funciones no son fijas, y se diseñan mediante un sistema de ecuaciones funcionales Castillo et al. (2012). En este sentido, un caso particular son las Redes de Base Radial (RBFNs), las cuales se distinguen por ser arquitecturas más sencillas que las redes completamente conectadas. Típicamente, las RBFNs constan de solo dos capas: una primera capa de funciones de base radial definidas por la ecuación 1, como:

$$\hat{y} = \sum_{i}^{m} w_i \phi_i(X) = \sum_{i}^{m} w_i \exp\Big(-\frac{||X-\mu_i||^2}{2\sigma_i^2}\Big), \quad (1)$$

donde X es el vector de entrada, μ_i es un vector prototipo y σ_i es un valor constante. La segunda capa corresponde a una salida lineal. Esto resulta en una función de aproximación que es una suma ponderada de dichas funciones de base radial, lo que facilita y acelera significativamente su entrenamiento en comparación con las redes densamente conectadas, Stenkin and Gorbachenko (2025); Aggarwal (2018).

A pesar de las ventajas de las RNF y las RBFNs, el desafío subsiste en la selección heurística de las funciones de pesos

⋆ Los autores expresan su agradecimiento al SECIHTI por el apoyo otorgado a través de su programa de becas nacionales de posgrado, cuyo respaldo ha sido esencial para el desarrollo de esta investigación. Este apoyo contribuye significativamente al fortalecimiento de la formación científica y a la realización de trabajos como el presente artículo.

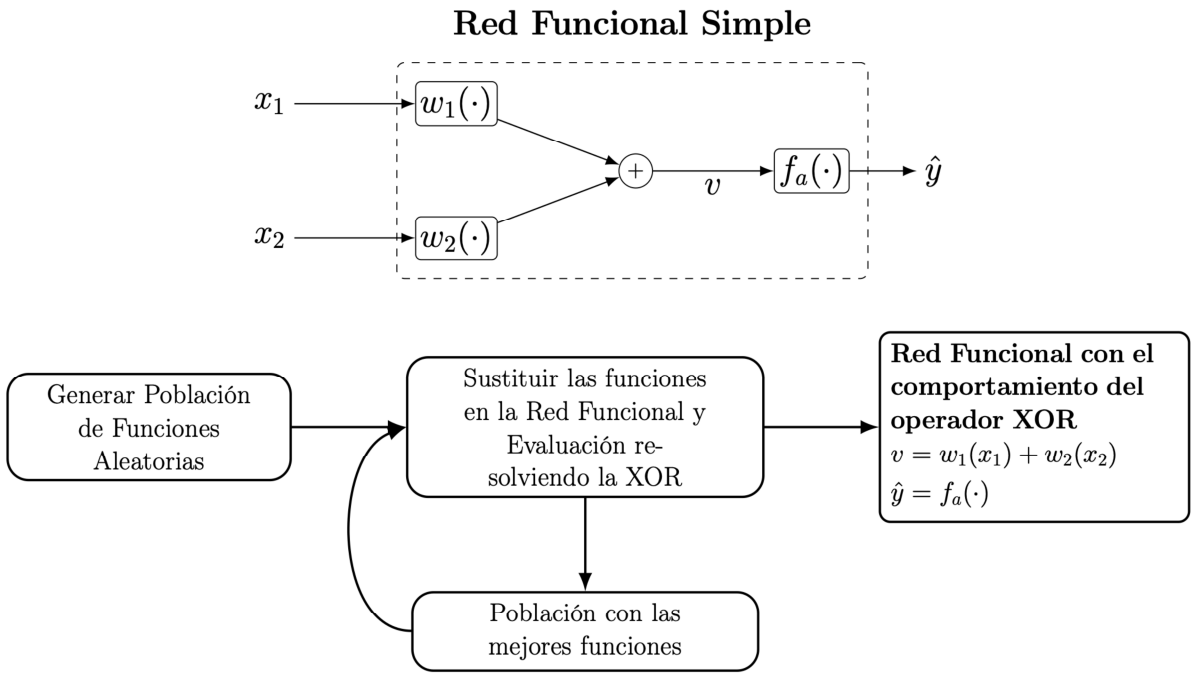


Fig. 1. Red Funcional y Proceso Evolutivo.

y activación. Aunque el método de mínimos cuadrados utilizado en las RNF ofrece un único mínimo para el error de aproximación, este enfoque no explora la vasta variedad de funciones que podrían optimizar aún más el rendimiento y la eficiencia del modelo, Smith and Doe (2020).

Para abordar la problemática anteriormente descrita, este trabajo propone una alternativa centrada en la optimización evolutiva de las funciones de peso y activación. El aprendizaje evolutivo nos permite encontrar nuevas funciones adecuadas para el diseño de este tipo de redes neuronales, debido a su capacidad intrínseca de la adaptación y selección de las mejores soluciones.

Específicamente, se propone utilizar la Programación Genética (PG) como un método de Neuroevolución para generar funciones de peso y de activación adecuados a este esquema. El objetivo principal es que estas funciones doten de un comportamiento no lineal a una Red Neuronal Funcional simple (compuesta de una sola neurona) y su rendimiento sea comparable con una Red Neuronal Multicapa tradicional. Particularmente se abordará el problema de emular el comportamiento de la compuerta XOR.

2. DISEÑO DE UNA RED NEURONAL FUNCIONAL SIMPLE UTILIZANDO PROGRAMACIÓN GENÉTICA

Una red neuronal funcional simple, como se ilustra en la Fig. 1, reemplaza los pesos numéricos del perceptrón por transformaciones simbólicas aplicadas a cada entrada. Cada variable se procesa mediante una función diseñada explícitamente; luego, las salidas se agregan con un sesgo y se aplica una activación monótona que determina la clase. En este caso no se emplea retropropagación: la estructura funcional se *selecciona* por un proceso evolutivo y no se ajusta por gradientes.

La hipótesis de este trabajo plantea que una Red Neuronal Funcionla simple (compuesta de una sola neurona), pueda resolver un problema no lineal. En este aspecto, se ha elegido el comportamiento de una compuerta lógica XOR como caso de estudio, ya que no es linealmente separable en el espacio original de dos entradas. Por ello, un perceptrón puramente aditivo con umbral no puede emular este comportamiento. Para solventar esto, se propone introducir una *característica de interacción* entre las entradas que vuelva separable el problema (véase el esquema superior de la Fig. 1).

La Programación Genética (PG) se utiliza para explorar, mediante árboles de expresión, operadores candidatos para las funciones de pesos, w_1 y w_2, así como para la funciones de activación f_a. Cada tripleta de funciones candidatas se evalúan sobre el esquema de la red neuronal funcional, ver parte superior de la Fig. 1; y su respuesta se compara con la salida de la tabla de verdad de XOR utilizando una métrica de error. El ciclo evolutivo de generación, selección, cruza y mutación, ver parte inferior de la Fig.1, va descubriendo expresiones que inducen separabilidad entre los datos de entrada. Una vez que la PG introduce una interacción adecuada entre las entradas, la red neuronal funcional simple tratará de emular correctamente la compuerta XOR.

2.1 Programación Genética Multi-árbol

La computación evolutiva imita el proceso de selección y reproducción natural, ayudando a producir soluciones con alta desempeño en problemas de búsqueda. Estas soluciones llamadas individuos, se evalúan de forma iterativa

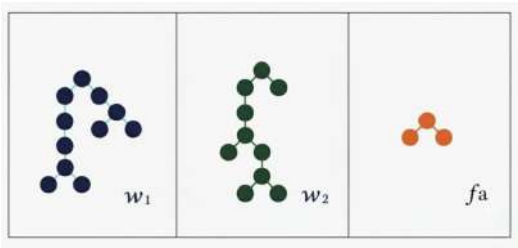


Fig. 2. Representación multi-árbol, cada árbol sintáctico representa una función, y la solución candidata o individuo es el conjunto de estas tres funciones.

en el problema y aquellas con una mejor aptitud se utilizan para crear nuevas poblaciones y de esta forma converger a una mejor solución. La programación genética es un método especializado dentro de los algoritmos evolutivos. Donde una solución se representa en forma de un árbol sintáctico, el cual, puede interpretarse como expresiones bajo una sintaxis formal. Dependiendo del problema estas pueden ser expresiones aritméticas, fórmulas en lógica de primer orden o código de lenguaje de programación. En una representación multi-árbol, cada individuo contiene varios árboles sintácticos. Entonces cada individuo es como un cromosoma de un algoritmo genético tradicional, donde cada gen es un árbol independiente que resuelve una parte de la tarea global.

El ciclo evolutivo en programación genética (PG) multi-árbol sigue los mismos principios básicos que la PG estándar, con adaptaciones en los operadores genéticos para manejar múltiples árboles por individuo. A continuación se describen las etapas principales de este ciclo evolutivo:

2.2 Inicialización de la Población:

Se genera aleatoriamente una población inicial de individuos. En el caso multi-árbol, cada individuo se inicializa creando varios árboles aleatorios, típicamente uno por cada componente funcional requerido. Para nuestro problema, solo es necesario utilizar una cadena de 3 árboles o funciones, $w_1(x_1)$, $w_2(x_2)$ y $f_a(v)$, respectivamente, ver Figura 2.

2.3 Espacio de búsqueda

El espacio de búsqueda del algoritmo evolutivo es conformado por todos los posibles operadores que pueden ser generados. Los elementos para construir dichos operadores son llamados funciones y terminales, en nuestro caso, se dividen en tres conjuntos, uno para cada operador propuesto $w_1(\cdot)$, $w_2(\cdot)$ y $f_a(\cdot)$, ver Tabla 1. Para w_1 y w_2 las funciones son similares, y estas comprenden operadores aritméticos, exponenciales y algunas funciones trigonométricas. Mientras que las terminales son algunas constantes, su respectiva entrada x_1, x_2 y siguiendo la propuesta de los RBFNs se proponen algunas expresiones exponenciales. Para generar las funciones de activación $f_a(\cdot)$ se incorporan operadores artiméticos, funciones suaves $\tanh(\cdot)$ y $\mathrm{erf}(\cdot)$, y algunos operadores trigonométricos; mientras su dominio se define sobre la variables v el cual se definió como la suma de w_1 y w_2, junto con algunas constantes $\{1, 3\}$.

Table 1. Funciones y terminales utilizados para el diseño de diseño de las funciones de peso w_i y la función de activación f_a.

Operador	Funciones	Terminales
$w_1(\cdot)$	$+$, $-$, $\times$, $\div$, $\log(\cdot)$, $e^{(\cdot)}$, $(\cdot)^2$, $(\cdot)^3$, $\sqrt{(\cdot)}$, $\sin(\cdot)$,$\cos(\cdot)$	x_1, e^{x_1}, $x_1e^{x_1}$, 1, 3, 0.5
$w_2(\cdot)$	$+$, $-$, $\times$, $\div$, $\log(\cdot)$, $e^{(\cdot)}$, $(\cdot)^2$, $(\cdot)^3$, $\sqrt{(\cdot)}$, $\sin(\cdot)$,$\cos(\cdot)$	x_2, e^{x_2}, $x_2e^{x_2}$, 1, 3, 0.5
$f_a(\cdot)$	$+$, $-$, $\times$, $\div$, $\log(\cdot)$, $e^{(\cdot)}$, $\tanh(\cdot)$, $\mathrm{erf}(\cdot)$, $\sqrt{(\cdot)}$, $\sin(\cdot)$,$\cos(\cdot)$	v, 1, 3

2.4 Evaluación (Función de Aptitud):

Cada individuo (conjunto de árboles) se ejecuta en el problema dado, evaluando su desempeño en la resolución del problema, esta métrica se le llama función de aptitud. En este caso, las funciones $w_1(x_1)$, y $w_2(x_2)$, actúan sobre las entradas x_1 y x_2, respectivamente y la salida de la red neuronal funcional se calcula como $y = f_a(v)$, donde $v = w_1(x_1) + w_2(x_2)$ y f_a es la función de activación. Las funciones w_1, w_2 y f_a se definen como funciones con dominio en los reales, con lo cual, la salida del sistema propuesto es un número real. Así, para el caso de la XOR, cuando las entradas x_1 y x_2 son diferentes, la salida es 1, en caso contrario, la salida es 0. Dado que se tiene una salida por cada par de entradas, una métrica para medir el desempeño de nuestro sistema con respecto al comportamiento deseado es la raíz del error cuadrático medio:

$$\text{aptitud}_\text{i} = \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(d_k - y_k\right)^2}\ . \qquad (2)$$

Donde N es el número de instancias, 4 para nuestro caso, d_k es la salida deseada por instancia y y_k es la salida obtenida por nuestro sistema. Así, para cada i-ésimo individuo se obtiene un valor de aptitud.

2.5 Selección

Igual que en otros algoritmos evolutivos, se aplica un método de selección, en este caso por torneo, para elegir individuos padres con mayor aptitud. La selección en PG multi-árbol trata a cada individuo en su totalidad, usando la *función aptitud*. Es decir, no se seleccionan árboles por separado, sino individuos completos (con todos sus árboles) para reproducirse. Además en esta selección, se penaliza la complejidad de los individuos, de modo que se favorecen a las soluciones parsimoniosas, para elegirse como padres.

2.6 Reproducción y Operadores Genéticos:

Esta fase incluye la creación de nuevos individuos a partir de los padres seleccionados, mediante cruzamiento y mutación. En el contexto multi-árbol, se definen dos tipos de cruzamiento y dos tipos de mutación de la siguiente forma:

- **Cruzamiento a nivel gen:** Consiste en intercambiar partes de dos individuos padres para crear descendientes. En PG multi-árbol, típicamente el cruzamiento opera sobre pares de árboles homólogos. Esto significa que, si los individuos tienen una estructura de N árboles cada uno, primero se elige al azar uno de los N árboles (por ejemplo, el árbol que corresponde a cierta función) y luego se selecciona un punto de cruce dentro de ese árbol. Se intercambian subárboles entre los dos padres solo en ese componente, mientras que el resto de los árboles de cada individuo se heredan sin cambio del respectivo progenitor. De esta manera, cada descendiente resultante conserva algunos árboles idénticos a los de sus padres y combina otros, manteniendo la coherencia en cuanto al rol de cada árbol.
- **Cruzamiento a nivel cromosoma** Se usa el método *cut-and-splice* (cortar y empalmar): dentro de la cadena de árboles sintácticos, se elige al azar un punto de cruce. A partir de ese punto se forman dos descendientes intercambiando segmentos entre ambos padres.
- **Mutación a nivel gen:** Este tipo de mutación se aplica de forma análoga a la PG estándar, pero especificando sobre qué árbol actuar. Primero se elige aleatoriamente uno de los árboles del individuo, luego se selecciona un nodo en ese árbol como punto de mutación. A partir de ese nodo, se reemplaza toda la subrama por un nuevo subárbol generado aleatoriamente (respetando las reglas sintácticas del problema). Los demás árboles del individuo permanecen inalterados. Este operador introduce variación novedosa en un solo componente de la solución sin alterar los otros componentes.
- **Mutación a nivel cromosoma:** Dentro de la cadena de árboles sintácticos se elige uno al azar y se remplaza por otro generado aleatoriamente.

2.7 Generación de la Nueva Población:

Tras aplicar los operadores genéticos, se obtiene un nuevo conjunto de individuos. Los descendientes reemplazan a la población anterior conservando al mejor individuo de la generaciónń anterior. Este es, se aplica un remplazo generacional con elitismo.

2.8 Condición de paro:

El proceso de evaluación → selección → reproducción se repite durante muchas generaciones (ciclos), hasta que se cumple un número máximo de generaciones. Durante el transcurso de la evolución, la población tiende a mejorar su aptitud promedio, evolucionando gradualmente mejores combinaciones de árboles que cooperan para resolver el problema.

3. RESULTADOS DE LA EVOLUCIÓN DE UNA RED FUNCIONAL SIMPLE PARA LA SOLUCIÓN DE LA XOR

El algoritmo evolutivo fue ejecutado 100 veces, cada ejecución se tomaron en cuenta 100 generaciones con 100 individuos en cada generación. La probabilidad de selección fue de 0.8 y la probabilidad de mutación de 0.3. Se utilizó elitismo manteniendo al mejor individuo de la generación anterior y ponderando aquellos con una menor complejidad estructural. Estos parámetros fueron propuestos, tras un periodo de sintonización.

Al final de cada ejecución se tiene un mejor individuo, esto es, al menos se obtuvieron 100 posibles soluciones que se aproximan al comportamiento del XOR. La Figura 3, muestra el comportamiento promedio del mejor individuo a lo largo del ciclo evolutivo.

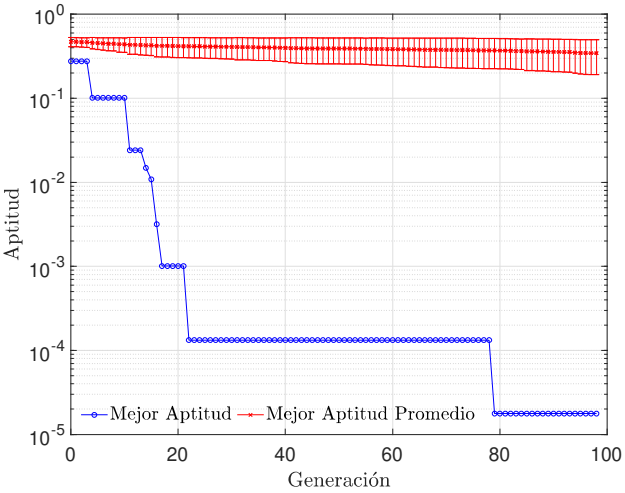


Fig. 3. Comportamiento promedio de la mejor aptitud a lo largo de 100 generaciones sobre 100 corridas diferentes.

3.1 Análisis de resultados.

La Tabla 2 reporta 18 diferentes soluciones de las 100 obtenidas; estas se han elegido por su desempeño, comportamiento y simplicidad. Algunas funciones utilizan operadores que se ejecutan varias veces sobre un mismo argumento; en este caso se utiliza la notación $f^{\circ n}$ para denotar una composición de n-veces la misma función, por ejemplo: $f^{\circ 2}(x) = f(f(x))$.

Un resultado interesante es la solución 1; en este caso, el algoritmo evolutivo ha convergido a funciones lineales para los pesos (como se utiliza en la RNA Perceptrón común), pero se ha propuesto una función coseno para la función de activación. Sin embargo, esta solución ha alcanzado la peor aptitud de la Tabla 2. Esto quiere decir que dadas sus entradas solo alcanzan un valor aproximado al deseado; este comportamiento se ilustra en la Figura 4a, la cual es una gráfica en donde el eje X cotiene la tabulación de x_1, el eje Y son valores tabulares para x_2 y el eje Z son las salidas dadas por la RNF simple. La gráfica se ilustra como una superficie dado que las funciones propuestas son continuas; el operador XOR es discreto, por tanto, se espera que la salida de la RNF simple pase por los puntos $(0,0,0)$, $(0,1,1)$, $(1,0,1)$ y $(1,1,0)$. Así, los asteriscos rojos marcan los puntos deseados, mientras que los puntos azules, marcan la salida de la RNF en esos puntos.

Otras RNFs simples, que resultan en expresiones sencillas, son las soluciones 2 y 6, ver Tabla 2; estas generan superficies suaves que se ajustan a los puntos deseados

Table 2. Soluciones encontradas por la Programación Genética Multi-árbol, cada solución consta de una tripleta de funciones, que se enmarcan dentro de la estructura de una Red Neuronal Funcional Simple (RNF); $w_1(x_1)$ y $w_2(x_2)$ representan las funciones de peso y $f_a(v)$ la función de activación. La métrica que se ha tomado es la raiz del error cuadrático medio (RMSE), entre la salida discreta de una XOR y la RNF propuesta.

Solución	Aptitud (RMSE)	$w_1(x_1)$	$w_2(x_2)$	$f_n(v)$
1	0.401202	x_1	$0.1189 - x_2$	$\cos^{\circ 2}(v)$
2	0.357021	$x_1 e^{x_1}$	$\sin^{\circ 4}(x_2)$	$\mathrm{erf}^{\circ 2}(\sin(v))$
3	0.118081	$e^{\cos(e^{x_1})}$	$\sqrt{\ln\left(e^{x_2 e^{x_2}} \cdot \ln(e^{x_2}(x_2 e^{x_2})^2)\right)}$	$\ln(v)\,\ln\left(1-\sin(1+v)-v\right)\,\ln\left(3+[\ln(v)]^2\right)$
4	0.212472	e^{x_1}	$\sqrt{\sqrt{3} - x_2 e^{x_2}}$	$e^{-\cos(v) - \sin^{\circ 2}(v)}$
5	0.118323	$e^{3x_1} - x_1 e^{x_1}$	e^{x_2}	$\ln\left(3\cos(v)\right)$
6	0.249509	$\sqrt{x_1 e^{x_1}}$	x_2	$\sin(v)$
7	0.282089	$e^{x_1} e^{x_1} (0.5)^2$	x_2	$\cos(\ln(v))$
8	0.271060	x_1	e^{x_2}	$\mathrm{erf}(v) + \ln^{\circ 2}(v-3)$
9	0.101001	x_1^5	$3.6208 e^{2x_2}$	$\tanh(v) + \cos(v)$
10	0.02834	$x_1 e^{x_1}$	$3\cos^{\circ 6}(x_2)$	$\mathrm{erf}\left(\sin(v+1)+1\right)$
11	0.118323	$e^{3x_1} - x_1 e^{x_1}$	e^{x_2}	$\ln\left(3\cos(v)\right)$
12	0.249509	x_1	$\sqrt{x_2 e^{x_2}}$	$\sin(v)$
13	0.381213	$\ln(x_1 e^{x_1})$	$0.5 + x_2$	$\sin^{\circ 2}(v)$
14	0.096784	$e^{4x_1} x_1^3 \sqrt{e^{3x_1}}$	$(x_2 e^{x_2})^3$	$\sin(v)$
15	0.086394	$\left[(x_1 e^{x_1})^2 + 0.5\right]^2$	$\left[2\,(x_2 e^{x_2})^3 + 1\right]^2$	$\cos(v)$
16	0.284810	$x_1 e^{x_1}$	$x_2 e^{x_2}$	$\sin(3v)$
17	0.150661	e^{x_1}	$(x_2 - x_2 e^{x_2}) + (x_2^2)^4$	$\mathrm{erf}^{\circ 2}(3) - \ln(\sin(v)) - \mathrm{erf}(3)$
18	0.252959	$\ln^2\left(6 + 0.5 e^{x_1}\right)$	$\sin\left(e^{(x_2^2 e^{x_2})^2}\right)$	$e^{-\tanh(1)\sin(v) - 2\sin(2v)}$

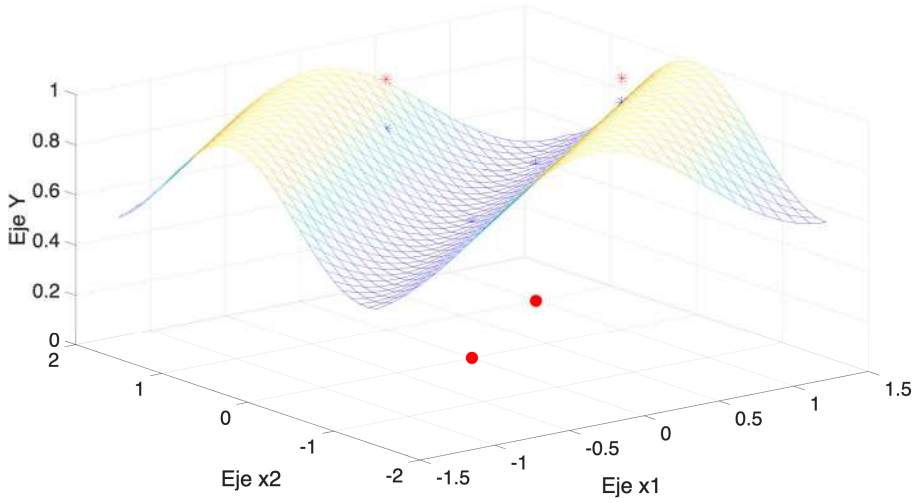
y sus errores son menores que la solución 1. En estas instancias, las funciones correspondientes a los pesos son funciones exponenciales y/o funciones trigonométricas. Ambas pueden interpretarse y analizarse a mayor detalle para un mejor diseño y generalización. Por ejemplo, la solución 2, ver Figura 4b, es posible rediseñarla de forma paramétrica como $w_1(x_1) = a x_1 e^{x_1}$, $w_2(x_2) = b\sin(x_2)$ y $f_a(v) = \mathrm{erf}(\sin(v)) + c$; lo cual resulta en la posibilidad de utilizar dicha RNF simple bajo otro tipo de problemas, solo ajustando pesos. La solución 6, presenta un RMSE de aproximadamente de 0.25, lo que indica que su ajuste del comportamiento resultante a los puntos deseados es muy cercano, ver Figura 4c, nótese que la superficie generada es suave y que las funciones utilizadas son una combinación de exponenciales y polinomios, donde estas funciones comúnmente on utilizadas como base para el espacio de funciones continuas. El comportamiento de estas soluciones pueden apreciarse en las Figuras 4 para las soluciones 2 y 6 respectivamente.

En general, las soluciones propuestas por la Programación Genética contemplan una combinación de funciones exponenciales, polinomiales y de seno y coseno, las cuales son funciones que se consideran generadoras para el espacio vectorial de funciones continuas. Por otra parte, se ha obtenido que una Red Neuronal Funcional simple, una sola neurona no lineal, es capaz de emular el comportamiento de la XOR, lo cual no es posible con un Perceptrón, y solo puede lograrse con un Perceptrón Multicapa con 2 neuronas de entrada, dos neuronas en una capa oculta y una neurona de salida. Lo anterior muestra que el enfoque propuesto lleva a la resolución de este problema en un solo paso.

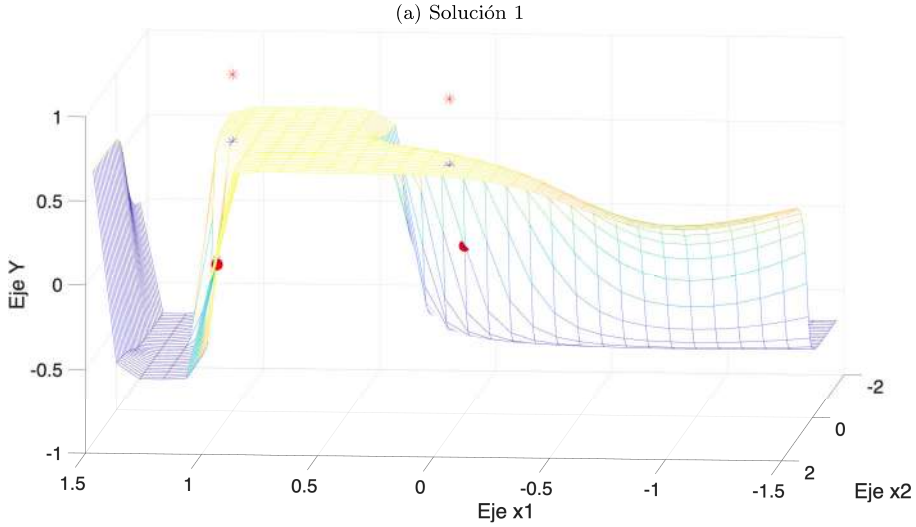
4. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra que la combinación de una red funcional con *Programación Genética* (PG) permite sintetizar automáticamente las transformaciones escalares $w_1(x_1)$ y $w_2(x_2)$, así como la función activación $f(v)$, de modo que una red funcional simple sea capaz de inducir fronteras de decisión de forma automática, para problemas no lineales; por ejemplo el emular el comportamiento de la compuerta XOR. Bajo este enfoque se obtuvieron más de 100 resultados que se ajustan al comportamiento desado. Los mejores individuos (Tabla 2) exhiben un patrón consistente: *no linealidades complementarias* en las entradas (p. ej., polinomio·exp en x_1 y composiciones trigonométricas en x_2) junto con activaciones de salida *saturantes y suaves* (como $\mathrm{erf}(\sin(\cdot))$), lo que produce superficies regulares y márgenes adecuados para resolver el problema dado. El enfoque reduce la necesidad de arquitecturas profundas, mantiene interpretabilidad simbólica y resulta atractivo para implementaciones con restricciones computacionales.

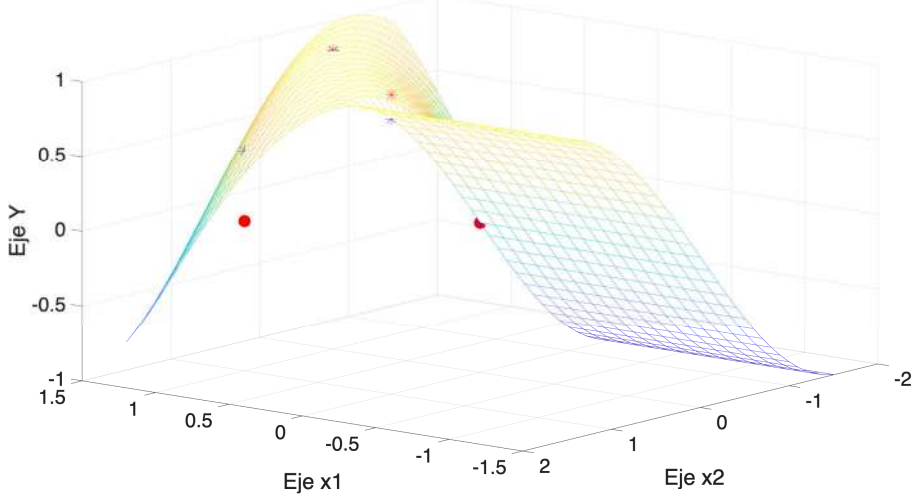
Como trabajos futuros, se propone: (i) extender la topología hacia dominios de mayor dimensionalidad, generalizando el esquema a n entradas mediante funciones paramétricas $w_i(x_i)$ que habiliten el tratamiento de variables multi-dimensionales en tareas de clasificación y regresión; (ii) un modelo híbrido para la búsqueda simbólica evolutiva con aprendizaje supervisado, utilizando las expresiones obtenidas por Programación Genética como inicializaciones estructuradas que luego puedan refinarse por gradiente local (retropropagación u optimizadores adaptativos), conciliando interpretabilidad simbólica con alta precisión; (iii) validar implementaciones en hardware embebido de bajo consumo (GPU NVIDIA Jetson Nano/Orin Nano) para casos de uso en tiempo real—como detección



(a) Solución 1



(b) Solución 2



(c) Solución 6

Fig. 4. Comportamientos generados por las RNFs simples 1, 2 y 6 (ver Tabla 2). Las superficies producidas son suaves y continuas, y tienden a ajustarse a los puntos deseados (asteriscos rojos).

de distracciones del conductor, reconocimiento de acciones y segmentación de objetos en sistemas de visión. El bajo consumo computacional del modelo favorece su despliegue en dispositivos con recursos limitados; y (iv) estudiar rigurosamente la estabilidad y convergencia del proceso evolutivo mediante métricas de diversidad poblacional, complejidad simbólica y entropía funcional, con el objetivo de detectar convergencia prematura y guiar el ajuste adaptativo de los parámetros evolutivos, mejorando así la robustez, consistencia y capacidad de generalización de las soluciones encontradas. Lo anterior permitirá la verificar la generalización de esta metodología más allá de la XOR, permitiendo una comparación en desempeño contra Redes Neuronales Artificial multicapa y Redes Neuronales Profundas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al SECIHTI por el apoyo otorgado a través de su programa de becas nacionales de posgrado, y al proyecto TecNM, clave: 21639.25-P. Cuyo respaldo ha sido esencial para el desarrollo de esta investigación. Este apoyo contribuye significativamente al fortalecimiento de la formación científica y a la realización de trabajos como el presente artículo.

REFERENCIAS

Aggarwal, C.C. (2018). *Neural Networks and Deep Learning: A Textbook*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1st edition.

Bayat, F.M., Guo, X., and Strukov, D. (2017). Exponential-weight multilayer perceptron. In *2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 3709–3715. doi: 10.1109/IJCNN.2017.7966323.

Castillo, E., Cobo, A., Gutierrez, J.A., and Pruneda, R.E. (2012). *Functional networks with applications: a neural-based paradigm*, volume 473. Springer Science & Business Media.

Kamarthi, S. and Pittner, S. (1999). Accelerating neural network training using weight extrapolations. *Neural Networks*, 12(9), 1285–1299. doi: https://doi.org/10.1016/S0893-6080(99)00072-6.

Smith, J. and Doe, J. (2020). Deep learning for image recognition. *Journal of Artificial Intelligence*.

Stenkin, D. and Gorbachenko, V. (2025). Solving problems of mathematical physics on radial basis function networks. *Moscow University Physics Bulletin*, 79, S706–S711. doi:10.3103/S0027134924702163.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Identification of Type 2 Diabetes Subgroups by combining Graph Analysis and Unsupervised Machine Learning Algorithms in a Mexican Cohort

Raúl Illescas Velázquez*, Alejandra García-Hernández *, Carlos E. Galván-Tejada*, Miguel Cruz, Sodel Vázquez-Reyes*, Alejandro Mauricio-González*, Perla Velasco-Elizondo***

** Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, México.*

***Unidad de Investigación Médica en Bioquímica, Hospital de Especialidades, Centro Médico Nacional Siglo XXI, Instituto Mexicano del Seguro Social, México.*

Abstract: Diabetes is a highly prevalent disease in Mexico, with increasing incidence. Some recent research has been done about its heterogeneity. Traditional clustering techniques have identified subtypes of type 2 diabetes in European cohorts, but more research is needed there is no recent research about its replicability on different ethnic populations. We propose a graph-based representation of clinical data to explore community detection in a cohort of 522 Mexican patients, constructed by similarity of each patients the clinical data records of each patient, using KNN algorithm. The communities were identified through the Louvain community detection approach. Results showed 8 latent clusters in the male population, whilst on female population there have been identified 9 clusters, with modularity values above 0.70 for each graph. Clusters labels were assigned according to the predominant clinical features of each group, including age, glycemic control, obesity and lipid profile, using the average z-scores of the variables. This approach allowed a clearer differentiation among clusters. These findings support the heterogeneity of type 2 diabetes and highlight the potential of graph-based machine learning approaches to uncover clinically relevant subgroups.

Keywords: machine learning, graph analysis, diabetes, subgroups, unsupervised clustering

1. INTRODUCTION

In Mexico, diabetes represents a major problem that is still under investigation and requires new strategies to halt its growing incidence. Since the 2010s, the prevalence of diabetes (both Type 1 and Type 2) in the Mexican population has been increasing. In the 2022 National Health and Nutrition Survey (ENSANUT), the prevalence of diabetes was estimated at 18.3%, which represents a total of 14.6 million people with this disease. Furthermore, it is estimated that 31.7% of people with this condition are unaware that they have it (Basto-Abreu et al., 2023).

According to the Diabetes Atlas published by the International Diabetes Federation (IDF), 10.5% of the adult population (20 79 years) has diabetes, and almost half are unaware of it. By 2045, IDF projections show that 1 in 8 adults, approximately 783 million, will be living with diabetes, an increase of 46% (International Diabetes Federation, 2025).

It is vitally important to continue researching this disease, since recent studies have demonstrated the heterogeneity of diabetes, especially in Type 2. In the research of Ahlqvist et al (2018), through a hierarchical clustering process, in addition to a previous analysis with the silhouette index in some European cohorts, it was possible to identify that patients with diabetes could be classified into 5 main types through their clinical and genetic data, to which descriptive names were assigned according to the characteristics of each subgroup. Subsequently, Rohmann et al. (2025) used the same classification framework to apply it to a set of German patients (FoCus) and obtained similar results to those presented in the analysis of the ANDIS cohort subtypes, with a more in-depth evaluation of the psychological, lifestyle and education aspects. This makes it evident that it is possible to deepen the analysis within the patterns and characteristics within Type 2 Diabetes.

Within the field of Artificial Intelligence and Machine Learning, the use of graphs to represent data has gained great relevance in recent years. This is because they allow superior representation of data in different disciplines, and with these structures, it is not only possible to represent the vectors of each entity, but it is also capable of representing the relationships that exist between them, unlike vector representations (which are usually tabular) used in traditional machine learning (Nikolentzos et al., 2021).

Graph representation of clinical data can be used to find patterns within the data that traditional machine learning algorithms may not account for. Graph representation of clinical data can reveal behaviors or new characteristics that are difficult to identify using unsupervised learning models alone (Costi et al., 2024). Thus, converting tabular data into graphs can be a novel approach for common clustering. This work proposes using the Louvain algorithm for community detection in graphs in a dataset from a Mexican population. The dataset contains observations not just from new diagnosed diabetic patients, but with several years of disease. This approach might throw new information about patterns in

diabetic populations and mark the differences between ethnic groups.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Dataset

For this research, the dataset used was from "Unidad de Investigación Médica en Bioquímica, Centro Médico Nacional Siglo XXI, Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS)". This dataset contains 538 observations with clinical and paraclinical data on Mexican individuals. The patients registered in the database range in age from 30 to 70. The database contains a variety of information; it includes sociodemographic data as well as anthropometric information on lipid profiles, blood pressure, and blood chemistry. This information is essential for clinical trials for each patient. As shown in Table 1, the dataset also includes variables to determine whether the patient is on treatment, including lipid profiles, high blood pressure, and hyperglycemia.

Table 1. Variables maintained from original dataset

Dataset Variables	
Basic Information	
Sex	Patient sex
Age	Patient age
Age DX	Age when diabetes was diagnosed
Anthropometric Measures	
WHR	Waist-Hip Ratio
BMI	Body Max Index
Blood Chemistry	
GLU	Glucose (mg/dL)
Urea	Urea
CRE	Creatinine
HbA1c	Glycated Hemoglobin
GFR	Glomerular Filtration Rate
Blood Pressure	
SBP	Systolic Blood Pressure
DBP	Diastolic Blood Pressure
Lipids	
CHOL	Colesterol total
HDLc	High Density Lipoprotein
LDLc	Low Density Lipoprotein
TG	Triglycerides
Disease	
TYPE OF COMPLICATION T2D	Whether the patient developed any complications due to type 2 diabetes. Complications included are: Nephropathy, Retinopathy, Neuropathy, Gastropathy, Hypothyroidism, and Paresthesia

2.2 Feature Selection and Optimal cluster number

The objective of graph analysis is to identify similarities in the characteristics of patients with Type 2 Diabetes and in cases where complications occur. Variable selection for calculating patient similarity was based on a simple complication prediction model, and a new feature was added as a target. If the patient has at least one complication, it is equal to true; otherwise, it is false. This new feature was used to create the model and select the most relevant features. The model was trained with a 10-fold cross-validation to determine the most significant features. Two significant feature selections were then performed. Through a feature selection with Random Forest (RF) and ANOVA, the most significant features were determined. This approach will show the feature importances with RF, and the statistical significance of each feature based on the variance analysis with ANOVA. Both feature selection scores were averaged and sorted by this new value, as is shown in Table 2.

Table 2. Variables scored by mean

Feature Selection Scores			
Feature	***RF***	***ANOVA***	***SCORE***
crea	0.634442	1.000000	0.817221
GLU	1.000000	0.064522	0.532261
TFG	0.746590	0.302696	0.524643
HbA1c	0.756966	0.278737	0.517851
BMI	0.957407	0.066460	0.511934
UREA	0.454930	0.382117	0.418523
HDL	0.639423	0.103566	0.371494
TG	0.705923	0.012778	0.359351

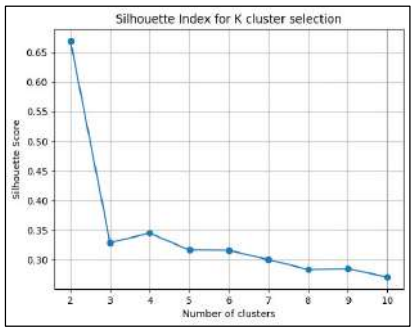


Fig. 1 Silhouette Index by number of clusters

Based on these scores, the first three features were selected: creatinine, GLU, and GFR. The creatinine variable obtained the best score according to statistical discrimination with ANOVA. The glucose variable (GLU) obtained the best score with RF, and the glomerular filtration rate (GFR) obtained the best average in both (Table 2). The three most significant features were selected because an increase in the modularity of the graph was observed in most of the tests when performing the analyses. Initially, a simple approximation was carried out to determine the optimal number of potential clusters within the data. Using a K-Means model, a score test was performed with each possible number of clusters (k = [2,10]). As shown in Fig. 1, when evaluating different clusters, for example, after changing from cluster 2 to cluster 3, the index drops considerably. After this behavior, it can be observed that point

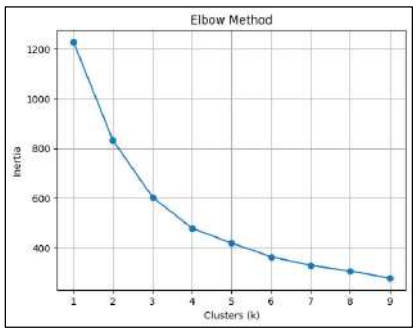


Fig. 2 Inertia rate by each cluster (Elbow Method to show best cluster partitions)

4 was the number of clusters with the highest value of silhouette index.

The structure of the implicit clusters within the data with the selected characteristics is not very good. According to silhouette values, the number between 0.5 and 1.0 indicates a strong structure and good cluster definition. Values below 0.5 indicate weak clusters with few differences or overlapping clusters. In addition, we also applied the elbow method to determine the inertia values. This method also helps determine the optimal number of clusters within the data. Fig. 2 shows that there is no clear value for selecting the optimal number of clusters. The inertia values keep decreasing, but gradually and not as abruptly at k=4 as would be expected to significantly differentiate the number of clusters. However, this value for optimal clusters within the data has been selected for the comparison in the Mexican cohort.

2.3 Graph Construction

When creating the graph, each patient was represented as a node. It is important to mention that each patient's data is represented in vectors containing each of the patient's characteristics. Each edge or connection in the graph between nodes represents the similarity that both nodes have with each other, that is, the similarity between their feature vectors. The first step was to define a similarity metric. Three main similarity measures were chosen: Euclidean, Cosine, and Manhattan (L1). After evaluating each of the distances, the Euclidean distance was selected for subsequent analyses, as it is more clearly used to observe the similarity between patients, which facilitates the interpretation of the results. All variables used were normalized when constructing the graph. Data were separated by sex, since in the context of Type 2 Diabetes, significant differences have been observed in development, symptoms, and clinical profile between the sexes. Separation by sex was useful for subsequent analyses. There were 203 male patients after the partition, and 310 female patients for female partition.

After calculating the similarities between patients, a graph was created using the Networkx Python library, and the relationships between each node were constructed using the K-Nearest Neighbors (KNN) algorithm. This created a similarity matrix based on the calculated distance between nodes. Using these similarities, the graph was constructed by determining which nodes were most like each other. A total of 10 nearest neighbors (k=10) were selected for each node, based on the similarity of their clinical variables. The results are shown on Fig. 3.

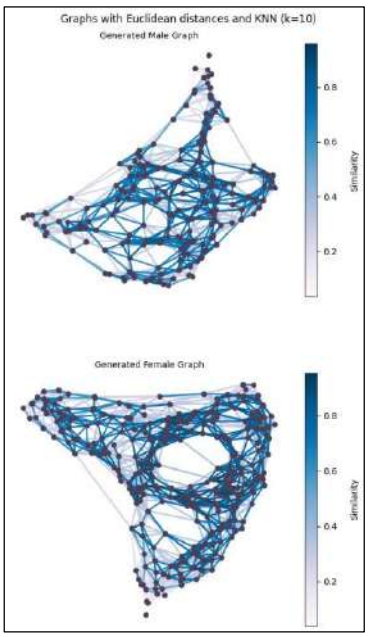


Fig 3 Generated graphs with Euclidean distances. *Similarity is determinated by the inverese euclidean distance.*

2.4 Community Detection

A community inside a network is a densely connected group of nodes having sparse connections with other nodes from other groups. The objective of the algorithm is to maximize the modularity of the graph, meaning that the connections inside the groups are greater than between them (Brahim et al., 2024). Since it is an exploration of the potential subtypes, it is necessary to use an algorithm that does not rely on a predetermined number of clusters but instead allows the identification of these possible communities inside the graph. The algorithms selected and compared were Louvain, HDBSCAN, and DBSCAN. Among them, Louvain showed better performance in terms of modularity, conductance, intra-cluster density and Adjusted Rand Index (ARI). These metrics indicate whether the clustering structure within the graph is stable and coherent. Results of this comparison are shown in Table 3. On the method column, the hyper-parameters for each algorithm are on parenthesis, like minimum cluster size for HDBSCAN, and epsilon and minimum samples for DBSCAN.

Table 3. Comparison between algorithms results

Method	ARI	Modularity	Conductance	Density
Louvain	0.7460	0.699935	0.20005	0.4063
HDBSCAN (5)	0.5884	0.520088	0.41786	0.6891
HDBSCAN (10)	0.5726	0.520088	0.41786	0.6891
HDBSCAN (15)	0.5781	0.520088	0.41786	0.6891
DBSCAN (0.5, 5)	0.3648	0.000088	0.93548	0.1954
DBSCAN (0.5, 10)	0.4106	0.000088	0.93548	0.1954
DBSCAN (0.7, 5)	0.3751	0.000088	0.93548	0.1954
DBSCAN (0.7, 10)	0.3839	0.000088	0.93548	0.1954

Then, Louvain algorithm was used to determine the clusters within the graph, multiple tests were performed. A total of 50 Louvain clustering tests were run, generating the number of clusters and calculating the modularity for each test. At the end

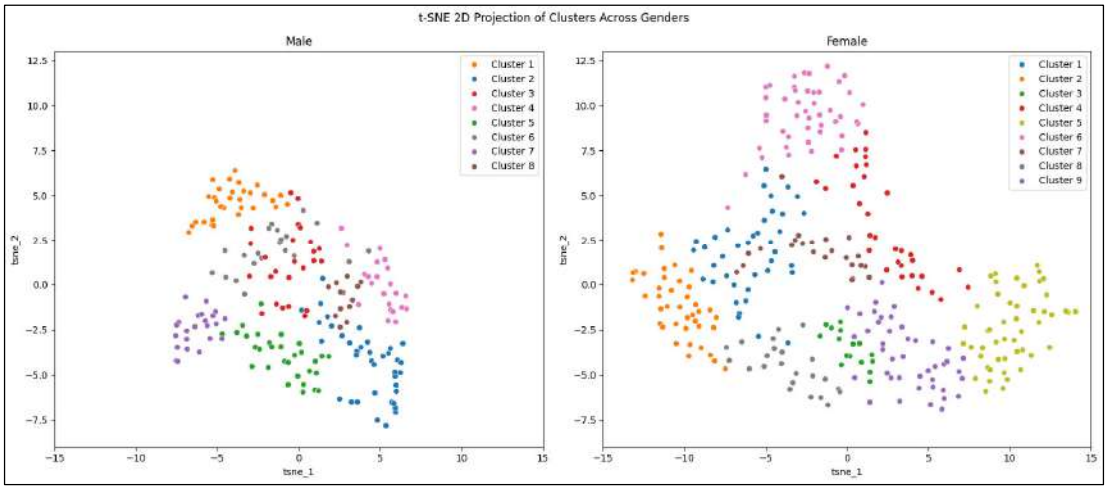


Fig. 4 t-SNE 2D projection of clusters across genders.

of the tests, the average modularity and the total number of clusters generated were calculated (Table 4).

Table 4. Louvain test results

Louvain Tests Results			
Distance	***Euclidean***	***Manhattan***	***Cosine***
Male	Clusters: 8.00 ± 0.20 Modularity: 0.7001 ± 0.0027	Clusters: 7.56 ± 0.50 Modularity: 0.6935 ± 0.0038	Clusters: 8.26 ± 0.56 Modularity: 0.7448 ± 0.0036
Female	Clusters: 9.82 ± 0.71 Modularity: 0.7308 ± 0.0042	Clusters: 8.80 ± 0.57 Modularity: 0.7237 ± 0.0040	Clusters: 11.06 ± 1.05 Modularity: 0.7712 ± 0.0021
Final Clusters	Male = 8 Female = 9	Male = 7 Female = 8	Male = 9 Female = 12

The Euclidean distance model was selected for subsequent analyses. Compared to the cosine distance model, it obtained less modularity in both graphs, but its results in node visualization and low-dimensional projections were more readable and easier to interpret, and on average it had more clusters with very low populations (approximately 10 nodes). With this distance, the graph constructed from male patients obtained an average of 8 clusters with a modularity of 0.73, while the graph of female patients detected an average of 9 clusters (9.82), as shown in Table 4.

There are several techniques for representing high-dimensional data into lower dimensions. In this work, the t-SNE technique was used for dimensionality reduction. This technique computes the probability distribution of each data point in high-dimensional space to project each point in the lower space, preserving the original relative distances. It is a powerful tool for data visualization in two or three dimensions (Van Der Maaten & Hinton, 2008). After generating the graphs using the same feature configuration, dimensionality reduction was performed with t-SNE to better visualize the clusters generated by the Louvain algorithm (Fig. 4).

The data in the female partition showed clearer separability than in the male partition. Clusters 2, 3, 4, 6, and 8 in the male partition showed considerable overlap. Cluster 8, with only 13 samples, overlaps significantly between clusters 2 and 4. This allows us to observe how the graph interprets the differences between clusters. Although the differences between these groups are not visible using a dimensionality reduction technique, community detection using the Louvain algorithm allows them to be completely differentiated, which is usually a much more complex task for other techniques.

3. RESULTS

The results were compared with the work by Ahlqvist et al. (2018), in which four subtypes of type 2 diabetes were identified. K-Means with 4 clusters (k=4) was applied as a starting poin to assess whether a similar structure existed in the mexican cohort. In that study, data were obtained from newly diagnosed type 2 diabetes patients. To aproximate these conditions, patients who were recently diagnosed (<2 yeas, n = 50) were classified, in addition to analyzing the entire cohor (n = 513). As shown in Table 5, the resulting partitions displayed a highly unbalanced distribution which persisted even after testing with other values of k (between 2 and 10). This indicates that the data are not naturally separable using K-Means. The purpose of this comparison was to highlight the need for a methodological and technical shift in accordance with the nature of the dataset and also the selected variables, rather than discredit the application of K-Means of the findings of the previous studies.

Table 5. Cluster distribution with K-Means clustering

Partition	***Sex***	***K***	***Distributions***
All patients (n = 513)	Male	4	28, 6, 60, 109
		8	39, 13, 26, 54, 7, 1, 19, 44
	Female	4	57, 132, 118, 3
		9	60, 43, 54, 2, 94, 37, 1, 19
Newly diagnosed patients (n = 50)	Male	4	6, 8, 1, 3
		8	4, 1, 1, 1, 1, 6, 3, 1
	Female	4	4, 10, 17, 1
		9	4, 3, 3, 1, 2, 8, 6, 5

Means and standardized Z-scores of variables by cluster, stratified by sex																								
Male Partition																								
	AGE		**AGE DX**		**CHOL**		**TG**		**HDL**		**LDL**		**CREA**		**GFR**		**GLU**		**BMI**		**WHR**		**HbA1c**	
1	48.48	-0.85	42.13	-0.34	170.68	-0.18	204.03	0.17	34.77	-0.39	119.52	-0.06	0.78	-0.48	160.65	1.62	121.65	-0.35	34.43	1.13	1.00	0.42	6.12	-0.47
2	61.82	0.34	43.87	-0.11	178.26	0.00	169.95	-0.13	39.00	-0.02	119.00	-0.08	1.64	1.29	60.09	-1.07	119.37	-0.39	27.67	-0.16	0.98	0.01	7.07	-0.13
3	53.80	-0.37	45.00	0.04	185.20	0.16	166.96	-0.16	41.64	0.22	128.72	0.22	0.96	-0.11	111.34	0.30	126.44	-0.28	31.20	0.51	0.99	0.22	6.64	-0.29
4	66.41	0.74	45.23	0.07	165.68	-0.30	123.73	-0.54	42.18	0.27	113.82	-0.24	0.89	-0.24	73.00	-0.72	81.73	-0.97	24.38	-0.80	0.94	-0.52	6.50	-0.33
5	65.23	0.64	47.93	0.42	182.97	0.11	187.23	0.02	39.33	0.01	124.43	0.09	0.97	-0.08	79.90	-0.54	179.97	0.56	26.55	-0.38	0.97	-0.12	8.25	0.28
6	53.67	-0.39	44.62	-0.01	163.00	-0.36	150.71	-0.30	37.95	-0.11	110.95	-0.33	0.71	-0.60	117.11	0.46	131.19	-0.20	26.57	-0.38	0.96	-0.29	7.52	0.02
7	53.35	-0.41	43.30	-0.19	204.00	0.60	311.87	1.13	38.04	-0.10	136.39	0.46	0.80	-0.42	118.13	0.48	276.52	2.06	28.22	-0.06	1.00	0.33	11.28	1.34
8	62.38	0.39	47.31	0.34	173.92	-0.10	143.15	-0.37	44.00	0.43	117.85	-0.12	0.96	-0.11	84.00	-0.43	115.00	-0.45	27.18	-0.26	0.95	-0.41	6.20	-0.44
p	***		-		-		***		-		-		***		***		***		***		*		***	
Female Partition																								
	AGE		**AGE DX**		**CHOL**		**TG**		**HDL**		**LDL**		**CREA**		**GFR**		**GLU**		**BMI**		**WHR**		**HbA1c**	
1	53.97	-0.27	45.72	-0.01	204.0	0.10	196.5	0	45.31	-0.15	138.2	0.13	0.69	-0.28	120.6	0.69	151.9	0.01	33.25	0.54	0.898	0.03	7.334	-0.01
2	48.90	-0.86	43.7	-0.31	177.1	-0.48	197.1	0	42.00	-0.40	118.1	-0.46	0.601	-0.54	146.9	1.52	111.5	-0.63	33.68	0.62	0.89	-0.11	6.497	-0.35
3	61.38	0.59	48.06	0.34	189.8	-0.21	209.1	0.11	44.25	-0.23	126.1	-0.23	0.638	-0.43	91.81	-0.22	116.6	-0.55	29.73	-0.11	0.924	0.48	6.907	-0.18
4	59.63	0.39	46.38	0.09	201.9	0.06	183.9	-0.11	49.03	0.13	137.2	0.10	0.764	-0.05	83.17	-0.49	173.9	0.35	29.08	-0.23	0.90	0.07	7.434	0.03
5	61.57	0.61	44.22	-0.23	207.9	0.19	191.9	-0.04	50.94	0.28	137.1	0.09	1.263	1.44	56.45	-1.34	134.4	-0.27	29.22	-0.20	0.906	0.16	7.573	0.09
6	54.00	-0.27	44.38	-0.21	215.4	0.35	274.6	0.67	43.02	-0.32	143.9	0.29	0.69	-0.28	109.1	0.33	272.8	1.91	30.84	0.09	0.892	-0.08	10.08	1.11
7	56.43	0.02	46.22	0.06	211.6	0.27	191.8	-0.04	49.22	0.15	144.7	0.31	0.609	-0.52	101.8	0.10	155.4	0.06	27.69	-0.49	0.886	-0.18	7.576	0.09
8	52.91	-0.39	48.04	0.33	186.9	-0.27	143.7	-0.46	47.35	0.01	127.0	-0.20	0.733	-0.15	106.5	0.25	92.13	-0.93	30.69	0.07	0.881	-0.26	5.421	-0.79
9	59.09	0.32	48.42	0.39	190.4	-0.19	155.2	-0.36	52.84	0.42	129.2	-0.14	0.769	-0.04	79.89	-0.60	106.7	-0.70	27.7	-0.49	0.895	-0.02	6.113	-0.50
p	***		*		***		***		**		**		***		***		***		***		-		***	

Fig. 6 Cluster means and standardized Z-scores for clinical variables, stratified by sex. *Average value on left, Z-score value on right for each variable column. Statistical significance of differences between clusters was assessed using the Kruskal-Wallis test with Benjamini-Hochberg FDR correction. Significance levels are indicated in row "p", by asterisks: ***p < 0.001, **p < 0.01, *p < 0.05.*

After using Louvain clustering, the new distributions of each cluster are more balanced (Fig. 5).

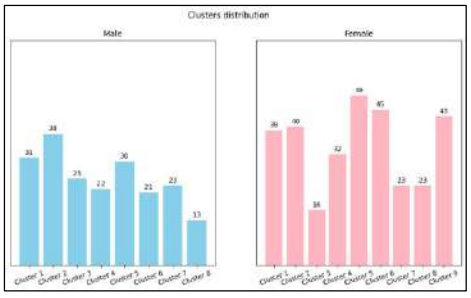


Fig. 5 Clusters distribution after using Louvain algorithm.

The characteristics for each partition (men and women) were determined. A Z-score test was performed and statistical significance was assessed through Kruskal-Wallis and Benjamini-Hochberg FDR (Fig. 6).

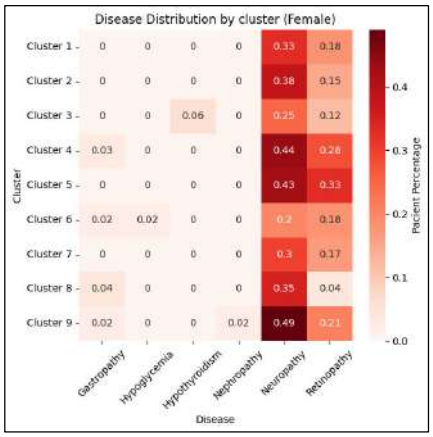


Fig. 8 Complication distributions for female clusters

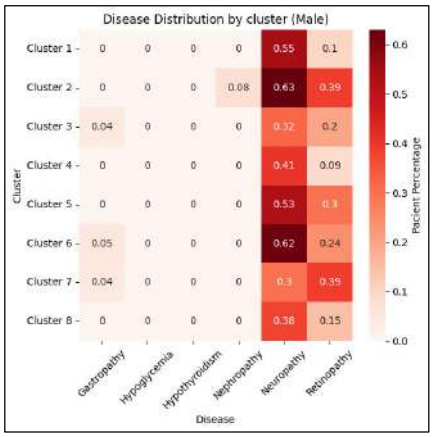


Fig. 7. Complications distribution for male clusters

The results for the groups detected in the male patient graph were a total of 8, according to the average of the tests performed with Louvain. Cluster 1 is composed of younger individuals (z=-0.85) but who are more obese, with a considerably elevated body mass index (BMI) (z=+1.13) and waist waist-hip ratio (WHR) higher than average (z=0.42), in addition to having the highest glomerular filtration rate (GFR) (z=+1.62). Cluster 2 had elevated creatinine (z=+1.29) but a lower GFR (z=-1.07). Cluster 4 had the lowest GFR and glucose (GLU) (z=-0.72, -0.97), as well as being the group with the lowest body mass, although interestingly, it is the oldest group (z=+0.74). Cluster 7 had the highest triglycerides (TG) concentration (z=+1.13) as well as very extreme levels of glucose (z=+2.06) and glycated hemoglobin (HbA1c) (z=+1.34), even though it was the second youngest group (z=-0.41). Clusters 3, 5, 6, and 8 did not show significant differences.

In the female patient graph: Cluster 1 had the second highest BMI (z=+0.54), while Cluster 2 had the highest index (z=+0.62) and the lowest high-density lipoprotein (HDL) and low-density lipoprotein (LDL) levels (z=-0.40, z=-0.46), and the highest GFR (z=+1.52). Cluster 5 was the oldest (z=+0.61) and it also had the highest creatinine levels and the lowest GFR levels (z=+1.44, z=-1.34). Cluster 6 had the highest triglyceride, glucose, and HbA1c levels (z=+0.67, z=+1.91, z=+1.11). Cluster 7 and Cluster 9 had the lowest body mass index (z=-0.49). Cluster 8 had the lowest triglyceride levels (z=-0.46), as well as glucose and HbA1c levels (z=-0.93, z=-0.79). Groups 3 and 4 showed no significant differences.

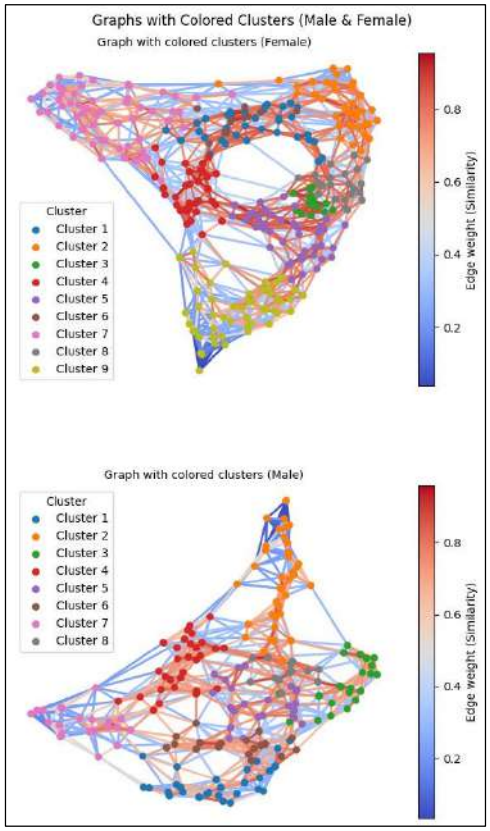


Fig. 9 Male and female graphs colored by cluster.

4. DISCUSSION

The results of this study reinforce the idea that Type 2 Diabetes is a heterogeneous disease. The study within a Mexican population, using a graph-based approach rather than a classical one, is of interest, particularly because the groups detected appear to be consistent with the groups described above, such as the young groups with severe obesity or the groups with decreased renal function. Also, the groups of patients with low GFR and elevated creatinine are those most likely to develop renal function complications.

Based on the assigned clusters, each group's behavior was analyzed in relation to diseases or complications. Broadly speaking, nephropathy and retinopathy accounted for the largest percentage of patients who experienced complications related to Type 2 Diabetes.

The disease distributions in male patients shows the same pattern. In Fig. 7, the most affected clusters are clusters 2 and 6. Cluster 2 in men show severe renal damage, which is characterized by high levels of creatinine (>1 mg/dL) and low GFR (<90 mL/min/1.73 m² on average).

As shown in Fig. 8, in the female patient partition, the clusters with the most diseases are clusters 4, 5, and 9. Cluster 9 has the highest percentage of neuropathies. In the male patient partition, cluster 2 contains 63% of patients with neuropathies.

Each cluster was described and classified with a name based on its principal characteristics. Each one of them appears sorted by its original index in the description below, in order to maintain the same coherency.

4.1 Male partition

- **Cluster 1 – Obesity with Poor Glycemic Control:** This cluster includes the youngest patients (mean age = 48.48 years), showing obesity (BMI = 34.43 kg/m²) and with high levels of GFR (160.64 mL/min/1.73m² on average). Although fasting glucose (GLU = 121.65 mg/dL) and HbA1c (6.12%) indicate moderate glycemic alteration, reflecting moderate metabolic disturbances associated with obesity. This is the third cluster more affected by neuropathies, since there are 55% (n = 17 patients) of their population suffering from this complication.
- **Cluster 2 – Severe Renal Damage:** The older cluster (age = 61.82 years) presented high levels of creatinine (CREA= 1.64 mg/dL), with the lowest GFR (60.09 mL/min/1.73m²), showing very high renal damage. It has the highest number of patients with neuropathies with 63% (n = 24) and for retinopathies around 39% (n = 15).
- **Cluster 3 - Obesity with Mild Dyslipidemia:** This cluster with mean age of 53.8 years, was characterized with obesity (BMI = 31.2 kg/m²), and mild lipid elevation (CHOL = 185 mg/dL; LDL = 128.72 mg/dL). This group had 32% of the patients (n = 8) with neuropathies and 20% (n = 5) with retinopathies.
- **Cluster 4 - Age Related with Renal Decline:** This cluster included the oldest patients (age = 66.4 years), with the lowest levels of TG (123.72 mg/dL). It is composed of people with too low BMI and WHR (24.38 kg/m² and 0.94 respectively), and glycemic control was in near normal limits (GLU = 81.7 mg/dL; HbA1c =6.5%). It shows signs of renal damage as its GFR (73 mL/min/1.73 m²), but only 2 of the patients presented nephropathy. This group represents an older, metabolically stable diabetes stage.
- **Cluster 5 - Overweight, Dyslipidemia and Poor Glycemic Control:** With older patients (age= 65.23 years) with high levels of glucose (179.96 mg/dL). This cluster has shown bad glycemic control (HbA1c = 8.24%), with overweight status (BMI = 26.54 kg/m²; WHR = 0.96). Neuropathy was reported in 53% (n = 16).
- **Cluster 6 - Metabolic Syndrome with Poor Glycemic Control:** This cluster (age = 53.66 years) with levels of HDL (37.95 mg/dL) which maybe can be a risk factor for cardiovascular complications and has high levels of glucose (GLU = 131.19 mg/dL and HbA1c = 7.52%). This cluster has 62% (n = 13) of its patients with neuropathies complications and 5 patients with retinopathies. The

profile suggests insulin resistance and cardiovascular risk consistent with metabolic syndrome.

- **Cluster 7 - Severe Hyperglycemia with Dyslipidemia:** This cluster was characterized by the highest glycemic values (GLU = 276.5 mg/dL; HbA1c = 11.27%) and elevated lipid levels (CHOL = 204 mg/dL; TG = 311.9 mg/dL; LDL = 136.4 mg/dL). Patients were overweight (BMI = 28.22 kg/m²; WHR = 0.99), which can address high abdominal mass. This group also shows similar distribution in neuropathies (30%; n = 7) and retinopathies (39%; n = 9).
- **Cluster 8 - Age Related:** Patients (age = 62.38 years) had the highest levels of HDL (44.0mg/dL), and on average glucose levels of 115 mg/dL, but with GFR (84 mL/min/1.73m²), which shows mild renal decline. This cluster represents a non-aggressive, age-related group with preserved metabolic function, but with complications as well: Neuropathies (38%; n = 5) and retinopathies (15%; n = 2)

4.2 Female partition

- **Cluster 1 - Obesity with Poor Glycemic Control: Mean** age = 53 years old. Good levels of GFR (120 mL/min/1.73m^2) but show poor glycemic control (GLU= 151.9 mg/dL; HbA1c = 7.33%), with obesity (BMI = 33.24 kg/m²) and high levels of TG and LDL (196.48 mg/dL and 138.23 mg/dL). 33% (n = 13) of the patients had neuropathies and 18% (n = 7) had retinopathies
- **Cluster 2 – Obesity with Mild Dyslipidemia:** The youngest cluster (age = 48 years), with obesity (BMI = 33.68 kg/m²) and mild glycemic alteration (GLU = 111.5 mg/dL; HbA1c = 6.49%). The complications in this cluster were neuropathies (38%; n = 15) and retinopathies (15%; n = 6). This group represents mild obesity-related patients.
- **Cluster 3 - Dyslipidemia with Renal Decline:** With mean age = 61 years, with high levels of TG (209.1 mg/dL) and with slightly reduced GFR (91.81 mL/mid/1.73m²), which can be a sign of renal damage. Also 25% (n = 4) suffered from neuropathies and 12% from retinopathies (n = 2). This group represents initial renal compromise.
- **Cluster 4 - Metabolic Syndrome with Poor Glycemic Control:** 59 years old on average. This show features consistent with metabolic syndrome, high TG (183.9 mg/dL), low HDL (49.0 mg/dL), central adiposity (WHR = 0.90), low levels of GFR (83.16 mL/min/1.73 m²) and poor glycemic control (GLU = 173.9 mg/dL HbA1c = 7.43%), with complication distribution of neuropathies with 44% (n = 14) and retinopathies with 28% (n = 9)
- **Cluster 5 – Severe Renal Damage:** Mean age = 61.57 years. It has severe renal damage as it shows the lowest GFR (56.44 mL/min/1.73m²) and high creatinine (1.26 mg/dL). Poor glycemic control as well (GLU = 134.4 mg/dL; HbA1c = 7.57%), and patients were overweight (BMI = 29.22 kg/m²). Complications of this group were as well only neuropathies (43%; n = 21) and retinopathies (33%; n = 16)
- **Cluster 6 - Severe Hyperglycemia with Dyslipidemia:** Mean age = 54 years. Patients presented bad glycemic control (GLU = 272.8 mg/dL; HbA1c = 10%). It also has severe dyslipidemia with (CHOL= 215.35 mg/dL; TG around 274.64 mg/dL; LDL = 143.87 mg/dL). Obesity (BMI = 30.83 kg/m²) was evident, showing a profile corresponding to severe insulin deficiency with metabolic decompensation, and 20% of the patients neuropathies (n = 9) and 18% with retinopathies (n = 8).
- **Cluster 7 - Overweight, Dyslipidemia and Poor Glycemic Control:** Average age of 56.4 years. This cluster has the highest levels of cholesterol (211.6 mg/dL) and poor glycemic (GLU = 155.43 mg/dL; HbA1c = 7.57%), as well as overweight status BMI = 27.69 kg/m²). In complications, only 7 patients (30%) presented neuropathies and 4 (17%) retinopathies.
- **Cluster 8 - Obesity with Good Glycemic Control:** Age = 52.9 years, with obesity (BMI = 30.69 kg/m²) but good glycemic control (GLU = 92.1 mg/dL; HbA1c = 5.42 %). The cluster presented 1 patient with retinopathy and 8 patients (35%) with neuropathies. This group may represent a benign obesity phenotype distinct from the male population.
- **Cluster 9 - Age Related with Renal Decline:** Mean age = 59.1 years. Lipid profile within normal limits (CHOL = 190.4 mg/dL; TG = 155.2 mg/dL; HDL = 52.8 mg/dL), with slightly reduced renal function (GFR = 79.88 mL/min/1.73 m²). Glycemic control was acceptable (HbA1c = 6.11 %; GLU = 106.7 mg/dL). Neuropathies were presented in 49% (n = 21) patients, and retinopathies in 9 of them (21%). Represents an older, metabolically stable phenotype with early renal decline.

Several clinical variables showed statistically significant differences between clusters, suggesting that the identified subgroups present distinct metabolic and demographic profiles, and can be clinically differentiable. According to the ANOVA test on the data, most significant variables for the male clusters were Age, TG, Creatinine, GFR, GLU, BMI, and HbA1c. For the female clusters, the most significant variables were Age, CHOL, TG, Creatinine, GFR, GLU, and HbA1c.

When classical K-Means approach was used, forcing four clusters on each partition, the clusters were not naturally separated and extremely unbalanced evaluating all patients (g.e. 4M = 109 vs 2M = 6). On the newly diagnosed patients, some clusters have only one patient (3M, 4F). Also, when implementing higher values of k, the same results were observed.

The clusters in the data are better separated when represented as graphs. Unlike the projections made with the original data, the clusters in this representation do not have such marked overlaps, with the exception of cluster 6 in the female graph, which have high closeness to cluster 1 as shown in Fig. 9.

5. LIMITATIONS

One of the main limitations of this study was the number of neighbors used to construct each graph, since every single node has 10 neighbors (k = 10). It is possible that a greater number of tests and more in-depth analyses positively impact the graph's modularity through a more appropriate selection of the number of neighbors each node can have.

The metrics and differences analyzed in each of the clusters need to be compared and evaluated using other types of

algorithms to gain a broader view of the patterns observed in this study, and multiple variables can be added in the analysis, such as genetic data.

Finally, the database is relatively small, and although community detection using the Louvain algorithm is very efficient with graphs of various sizes, the results may be biased. In this case, the amount of data, and especially the fact that it was divided by sex, resulted in the graphs containing only a few hundred nodes. For future research, it is advisable to switch to a larger dataset so that the graphs are much larger and it will be possible to analyze how these numbers also affect clustering. Furthermore, the dataset is cross-sectional, so a developmental or temporal analysis of patients with respect to the complications they may develop after diagnosis is not possible.

6. CONCLUSIONS

Using graph-based representations offers advantages in distinguishing and grouping data. Graphs can capture complex relational and structural patterns, which may be particularly valuable in the clinical diagnosis of multifactorial diseases. Diabetes, for instance, is a complex condition involving multiple biochemical systems. Segmenting patients at the time of diagnosis could lead to a better understanding of individual cases and support more personalized and effective treatments, potentially reducing the risk of severe complications caused by inappropriate medication. However, further research is needed to evaluate how well graph structures can uncover latent clusters in data that do not exhibit clearly separable groups at first glance. This work has shown that there are differences between European and Mexican cohorts, and some approaches cannot be replicated. Some patterns shown in previous works can be projected on this population, but several differences have been identified.

7. ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank SECIHTI for the support granted by their national scholarship program to Raúl Illescas Velázquez.

REFERENCES

Ahlqvist, E., Storm, P., Käräjämäki, A., Martinell, M., Dorkhan, M., Carlsson, A., Vikman, P., Prasad, R. B., Aly, D. M., Almgren, P., Wessman, Y., Shaat, N., Spégel, P., Mulder, H., Lindholm, E., Melander, O., Hansson, O., Malmqvist, U., Lernmark, Å., … Groop, L. (2018). Novel subgroups of adult-onset diabetes and their association with outcomes: a data-driven cluster analysis of six variables. *The Lancet Diabetes and Endocrinology*, *6*(5), 361–369. https://doi.org/10.1016/S2213-8587(18)30051-2

Basto-Abreu, A., López-Olmedo, N., Rojas-Martínez, R., Aguilar-Salinas, C. A., Moreno-Banda, G. L., Carnalla, M., Rivera, J. A., Romero-Martínez, M., Barquera, S., & Barrientos-Gutiérrez, T. (2023). Prevalence of prediabetes and diabetes in Mexico: Ensanut 2022. *Salud Publica de Mexico*, *65*. https://doi.org/10.21149/14832

Brahim, L., Mouad, M., Chihab-Eddine, C., & Ali, I. (2024). A SURVEY ON COMMUNITY DETECTION: APPLICATIONS, ALGORITHMS, AND CHALLENGES. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, *30*(12). www.jatit.org

Costi, F., Onchis, D., Hogea, E., & Istin, C. (2024). Predictive Modeling for Diabetes Using GraphLIME. *MedRxiv*, 2024.03.14.24304281. https://doi.org/10.1101/2024.03.14.24304281

International Diabetes Federation. (2025). *IDF Diabetes Atlas 11th Edition - 2025*. https://diabetesatlas.org/resources/idf-diabetes-atlas-2025/

Nikolentzos, G., Siglidis, G., & Vazirgiannis, M. (2021). Graph Kernels: A Survey. *Journal of Artificial Intelligence Research*, *72*, 943–1027. https://doi.org/10.1613/jair.1.13225

Rohmann, N., Epe, J., Geisler, C., Schlicht, K., Türk, K., Hartmann, K., Kruse, L., Koppenhagen, J., Kohestani, A. Y., Adam, T., Bang, C., Franke, A., Schulte, D. M., Hollstein, T., & Laudes, M. (2025). Comprehensive evaluation of diabetes subtypes in a European cohort reveals stronger differences of lifestyle, education and psychosocial parameters compared to metabolic or inflammatory factors. *Cardiovascular Diabetology*, *24*(1), 1–14. https://doi.org/10.1186/S12933-025-02660-5/FIGURES/6

Van Der Maaten, L., & Hinton, G. (2008). Visualizing Data using t-SNE. *Journal of Machine Learning Research*, *9*, 2579–2605.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Intelligent Assistive System for the Early Detection and Mitigation of Hallux Valgus and Flat Foot Using Computer Vision

C. E. Soriano Rubio [*], **N. D. García Morales** [*], **I. I. Zetina Rios** [*], **G. L. Osorio Gordillo** [**] **M. R. Ponciano Chigo** [**]

[*] *ITSMIGRA, Tecnológico Nacional de México, 71140 San Miguel el Grande, Oax.*
[**] *CENIDET, Tecnológico Nacional de México, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, 62490 Cuernavaca, Mor, México.*

email:israelisaac.zr@smiguelgde.tecnm.mx, gloria.og@cenidet.tecnm.mx, m23ce131@cenidet.tecnm.mx

Abstract: This paper presents the development of VisionComPodal, an intelligent assistive system designed for the non-invasive detection of podiatric deformities using computer vision and morphometric analysis. The system effectively identifies flat foot and hallux valgus by estimating key anatomical landmarks and angular deviations from digital images, achieving stable performance in controlled evaluations. A Python-based computational platform enables patient registration, visual analysis, and automatic report generation. While the integration of an automatic control module is planned for future work, the current implementation demonstrates the feasibility and robustness of vision-based diagnosis for preventive podiatric evaluation, laying a solid foundation for future adaptive control and rehabilitation applications.

Keywords: Computer vision, Hallux valgus, Intelligent assistive system, Foot analysis, Biomedical engineering, Preventive diagnostics.

1. INTRODUCCIÓN

Las deformidades podales, como el hallux valgus (juanete) y el pie plano, representan problemas frecuentes que, cuando no son detectados a tiempo, pueden derivar en dolor crónico, alteraciones posturales y dificultades de movilidad. La detección tardía o la falta de diagnóstico temprano suelen agravar la progresión de estas afecciones, complicando su tratamiento y reduciendo la calidad de vida de los pacientes. En el caso del hallux valgus, la desviación lateral del dedo gordo del pie altera la distribución del peso y puede generar inflamación y deformidad progresiva; mientras que el pie plano, al reducir el arco plantar, provoca desequilibrios biomecánicos que repercuten en rodillas, caderas y columna. Ambos trastornos comparten la necesidad de un diagnóstico oportuno y de herramientas accesibles que permitan su identificación en etapas iniciales (Nix et al., 2010b; Cai et al., 2023; Salinas-Torres et al., 2023).

La creciente integración de tecnologías inteligentes en sistemas biomédicos ha impulsado significativamente la forma en que las patologías son detectadas, monitoreadas y tratadas. En particular, la visión por computadora se ha convertido en un pilar para el análisis médico no invasivo, permitiendo la interpretación automatizada de imágenes para apoyar procesos de diagnóstico y rehabilitación. Durante las últimas décadas, diversos estudios han demostrado la viabilidad de aplicar técnicas de procesamiento de imágenes e inteligencia artificial a trastornos podiátricos y musculoesqueléticos. (Zhang et al., 2022) presenta una revisión integral de métodos basados en aprendizaje profundo para la detección de úlceras diabéticas en imágenes, destacando la precisión y eficiencia de estas técnicas. Un método basado en redes neuronales convolucionales (CNN) para la detección automática de deformidades en la muñeca mediante imágenes térmicas, complementadas con simulaciones biomecánicas para prever la progresión de la enfermedad, es presentado por (Thabet et al., 2014). Otras investigaciones se han centrado en el análisis tridimensional del pie, utilizando técnicas de visión estereoscópica o captura de movimiento. En (Zhang et al., 2023) se presenta un sistema de reconstrucción 3D para el análisis de deformaciones plantares durante la marcha. En el trabajo de (Ekerete et al., 2021b) se muestra la integración de sensores inerciales y visión por computadora para el monitoreo de rehabilitación del tobillo. Un sistema de clasificación remota de la marcha patológica, utilizando visión por computadora para detectar alteraciones en la marcha asociadas a diversas patologías es presentado en (Albuquerque et al., 2021). La referencia (Sarmun et al., 2024) presenta un dispositivo portátil basado en visión para la detección temprana de pie plano en niños, aprovechando modelos computacionales de crecimiento óseo. Estos desarrollos evidencian una tendencia clara hacia la fusión de técnicas de visión y modelado biomecánico para aplicaciones terapéuticas y preventivas.

⋆ This work was not supported by any organization

A pesar de los avances en visión por computadora aplicada al ámbito biomédico, aún es limitada su integración en la detección podológica no invasiva. Actualmente, su diagnóstico depende principalmente de la evaluación clínica y de mediciones manuales o radiográficas, métodos que requieren experiencia y pueden presentar variabilidad en la precisión. En este contexto, las herramientas automatizadas y de bajo costo basadas en visión por computadora se presentan como una alternativa viable para el diagnóstico temprano y el monitoreo personalizado. La principal contribución de este trabajo es el desarrollo de un sistema inteligente asistivo no invasivo para la detección temprana y mitigación de juanetes y pie plano, orientado al análisis podal mediante evaluación visual automatizada. El sistema emplea técnicas de visión por computadora para extraer parámetros morfométricos de imágenes del pie, permitiendo estimar la desviación angular y clasificar el grado de deformidad según estándares clínicos. Además, se desarrolló una plataforma computacional en Python que permite registrar datos del paciente, visualizar resultados y facilitar el seguimiento diagnóstico, promoviendo una intervención oportuna por parte de los especialistas.

2. FUNDAMENTOS CONCEPTUALES SOBRE VISIÓN POR COMPUTADORA Y BIOMECÁNICA PODAL

2.1 Visión por computadora en el análisis podal

La visión por computadora constituye un pilar fundamental en el análisis biomédico moderno, al permitir la adquisición, procesamiento y comprensión automática de información visual proveniente de imágenes o secuencias de video. Su aplicación en podología ha impulsado el desarrollo de sistemas no invasivos para la detección, clasificación y seguimiento de deformidades del pie, como el *hallux valgus* (juanete) o el pie plano (Han et al., 2023; Pham et al., 2022). Los algoritmos de visión modernos se basan en arquitecturas de redes neuronales convolucionales (CNN) capaces de detectar puntos anatómicos clave y medir parámetros morfométricos, tales como el ángulo metatarsofalángico (*hallux valgus angle*, HVA) o el ángulo intermetatarsiano (IMA) (Zhang et al., 2021). Estas métricas permiten cuantificar de forma objetiva la gravedad de una deformidad y evaluar su progresión clínica.

A lo largo de la última década, la combinación de técnicas tradicionales de segmentación (como *Canny Edge Detection* o *Active Shape Models*) con arquitecturas profundas tipo YOLOv3/v5 y U-Net ha permitido alcanzar precisiones superiores al 95% en tareas de segmentación y clasificación de imágenes podales (Al-Basha et al., 2022; Han et al., 2023). Estos avances facilitan la creación de sistemas inteligentes capaces de operar en tiempo real, proporcionando resultados reproducibles y reduciendo la dependencia de la experiencia subjetiva del especialista. En México y otros países emergentes, el desarrollo de plataformas de bajo costo que integran visión por computadora con simulación terapéutica (como VisionComPodal) representa una alternativa accesible para la detección temprana de patologías podales, contribuyendo a la prevención y atención en contextos con limitada disponibilidad de especialistas (Maestre-Rendón et al., 2017; Wang et al., 2021).

2.2 Biomecánica del pie y deformidades estructurales

La biomecánica podal analiza la interacción entre los componentes óseos, musculares y ligamentarios del pie, así como las fuerzas que actúan durante la marcha y el soporte de peso (Nix et al., 2010a; Perera et al., 2011). El pie humano está constituido por 26 huesos distribuidos en el retropié, mediopié y antepié, conectados mediante articulaciones que permiten movilidad tridimensional, absorción de impacto y propulsión (Neumann, 2010). La Fig. 1 muestra los puntos principales del pie que se utilizan para evaluar la desviación del dedo gordo o juanete. A partir de estos puntos es posible medir los ángulos que indican el grado de deformidad y representar cómo se ve afectada la estructura del pie.

Fig. 1. Puntos anatómicos utilizados para el análisis del Hallux Valgus.

La Fig. 2 muestra las zonas del pie que se observan al analizar el pie plano. Se destacan el punto más bajo del arco interno (arch medial) y el punto más alto del borde externo (arch lateral), cuya diferencia de altura permite reconocer el aplanamiento del arco plantar.

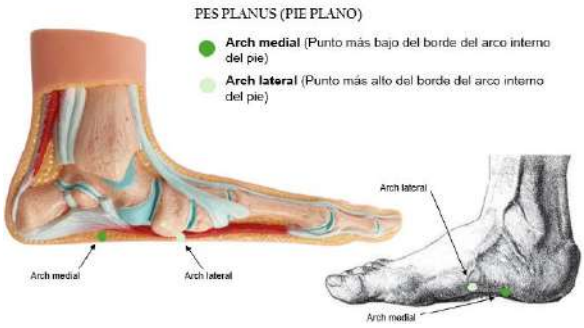


Fig. 2. Puntos anatómicos utilizados para el análisis del Hallux Valgus.

Alteraciones estructurales como el *hallux valgus* o el pie plano modifican la distribución de cargas y comprometen la estabilidad postural. El primero se caracteriza por la desviación lateral del primer dedo del pie y el desplazamiento medial del primer metatarsiano, mientras que el segundo implica el colapso del arco longitudinal medial (Biz et al., 2023; Martín-Casado et al., 2023). Ambas

condiciones pueden generar dolor, pérdida funcional y compensaciones biomecánicas en otras articulaciones de la extremidad inferior.

El estudio biomecánico permite establecer modelos predictivos de evolución de la deformidad y diseñar intervenciones ortopédicas y de rehabilitación. Herramientas como las plataformas de presión plantar, sistemas de captura de movimiento 3D y sensores inerciales (IMU) aportan información cinemática y cinética valiosa para caracterizar el comportamiento del pie durante la marcha (Wang et al., 2020; López et al., 2022). La integración de estos datos con visión por computadora potencia la precisión del diagnóstico funcional y facilita la personalización de tratamientos ortésicos o de rehabilitación.

2.3 Aprendizaje profundo y clasificación automática de deformidades

El auge del aprendizaje profundo (*Deep Learning*) ha cambiado el análisis automatizado de imágenes médicas, incluyendo el ámbito podológico. Las redes neuronales convolucionales (CNN) permiten distinguir entre pies sanos y con deformidades utilizando conjuntos de datos etiquetados y técnicas de entrenamiento supervisado Koh et al. (2020); Han et al. (2023). Modelos basados en *Transfer Learning*, como ResNet50, EfficientNet y MobileNet, han demostrado gran efectividad al requerir volúmenes reducidos de datos clínicos para generalizar adecuadamente en contextos reales Pham et al. (2022). Estas redes pueden integrarse en aplicaciones portátiles, smartphones o plataformas de diagnóstico remoto, ampliando el acceso a la evaluación podológica y reduciendo los costos asociados a métodos radiográficos. De manera complementaria, los enfoques híbridos que combinan visión por computadora con datos biomecánicos o cinemáticos han permitido desarrollar sistemas de evaluación integral del pie. Dichos sistemas pueden identificar patrones de movimiento anómalos y emitir recomendaciones terapéuticas personalizadas basadas en la gravedad de la deformidad y en la respuesta del paciente al tratamiento (Ekerete et al., 2021a; Yamashita et al., 2021).

2.4 Síntesis conceptual e integración interdisciplinaria

El estudio computacional del pie humano requiere una estrecha integración entre la biomecánica, la visión por computadora y la inteligencia artificial. La combinación de estas disciplinas posibilita el desarrollo de sistemas inteligentes capaces de detectar, modelar y corregir deformidades podales mediante enfoques no invasivos y de bajo costo. En la literatura reciente se observa una tendencia hacia modelos generativos y aprendizaje multimodal que combinan imágenes clínicas, señales de presión plantar y datos de movimiento Zhou et al. (2023). Estos avances sustentan el desarrollo de plataformas de asistencia podológica inteligente, capaces de operar tanto en entornos clínicos como domésticos, promoviendo la rehabilitación personalizada y la prevención de complicaciones derivadas de patologías estructurales del pie.

3. METODOLOGÍA

El desarrollo del sistema **VisionComPodal** se llevó a cabo bajo el marco metodológico ágil **Scrum**, adaptado a un entorno de investigación aplicada en ingeniería biomédica. Dada la naturaleza experimental del trabajo, se adoptó un enfoque flexible que permitiera incorporar modificaciones derivadas de la validación del modelo de inteligencia artificial y de la evolución de los módulos de aplicación y procesamiento visual.

Scrum proporciona un esquema iterativo e incremental que favorece la entrega continua de módulos funcionales, promoviendo una comunicación efectiva entre las áreas de inteligencia artificial, aplicación software y visión por computadora.

3.1 Estructura general del proceso ágil

El equipo de desarrollo estuvo conformado por un *Product Owner* (responsable de los objetivos clínicos y técnicos), un *Scrum Master* (encargado de la gestión del proceso y resolución de impedimentos), y un *Development Team* interdisciplinario compuesto por ingenieros biomédicos, desarrolladores de software y especialistas en visión artificial.

El proceso se estructuró en **sprints de dos semanas**, con reuniones de planificación, revisión técnica y retrospectiva. El *Product Backlog* se definió con base en los requerimientos funcionales del sistema: detección de deformidades podales (*hallux valgus* y pie plano) y diseño de una interfaz funcional para el diagnóstico automatizado.

3.2 Descripción detallada de los sprints

Sprint 0 — Configuración e infraestructura del entorno de desarrollo. Durante esta fase inicial se establecieron las herramientas colaborativas y de desarrollo:

- **GitHub** para control de versiones,
- **Trello** para gestión de tareas,
- **PyCharm** para desarrollo en *Python*, y
- **Roboflow** para la gestión, etiquetado y entrenamiento de la inteligencia artificial.

Se definió la estructura de carpetas, los flujos de integración y los lineamientos de documentación técnica. Además, se compiló el conjunto inicial de imágenes del pie en condiciones controladas y se prepararon los scripts para el preprocesamiento y normalización de los datos.

Sprint 1 — Entrenamiento y validación del modelo de inteligencia artificial. El objetivo principal de este sprint fue desarrollar el módulo de **visión artificial** basado en redes neuronales entrenadas en la plataforma **Roboflow**. Se creó un conjunto de datos etiquetado con diferentes tipos de pies (normales, planos y con juanete), y se entrenó un modelo de detección capaz de identificar los patrones visuales correspondientes a las principales deformidades podales. Durante la validación inicial, el modelo alcanzó una **precisión promedio del 80%** en la identificación de las estructuras anatómicas y condiciones del pie, estableciendo la base para su integración en la aplicación principal.

Sprint 2 — Análisis de patrones y detección del grado de deformidad. De acuerdo con la inteligencia artificial implementada en **Roboflow**, se desarrollaron los

algoritmos de interpretación y visualización en *Python*, que permiten analizar los resultados del modelo entrenado. La IA detecta los **patrones morfológicos asociados al grado de juanete y pie plano**, generando indicadores visuales y reportes automáticos que facilitan la evaluación clínica. Los resultados fueron validados sobre un conjunto de imágenes con condiciones variables de iluminación y orientación, manteniendo un rendimiento estable y coherente con los criterios definidos en el backlog.

Sprint 3 — Desarrollo de la aplicación e interfaz gráfica. El último sprint se centró en la creación de una **aplicación funcional y amigable** que integrara los resultados del análisis de la IA. Se diseñó una interfaz gráfica intuitiva desarrollada en *Python* (entorno **PyCharm**), que permite al usuario cargar imágenes, ejecutar el modelo entrenado y visualizar el diagnóstico con sus respectivas indicaciones. Asimismo, se documentaron los resultados técnicos y se elaboró el manual de usuario, junto con los reportes automáticos del sistema para su inclusión en el repositorio institucional y en la documentación científica.

3.3 Evaluación metodológica y criterios de aceptación

Cada sprint concluyó con una revisión técnica en la que se verificaron los *criterios de aceptación* establecidos:

- Precisión mínima del 80% en la detección de patrones,
- Correcta ejecución y visualización del modelo dentro de la aplicación,
- Estabilidad en el procesamiento de imágenes, y
- Coherencia entre los resultados generados por la IA y las anotaciones clínicas de referencia.

El enfoque iterativo permitió realizar mejoras incrementales, optimizando progresivamente la precisión, velocidad y usabilidad del sistema. En conjunto, la metodología Scrum aplicada permitió desarrollar un prototipo funcional, escalable y científicamente validado, integrando de forma efectiva las áreas de inteligencia artificial, aplicación y visión por computadora.

4. RESULTADOS

4.1 Módulo de visión por computadora

El módulo de visión por computadora constituye el componente principal del sistema **VisionComPodal**. Su propósito es detectar y analizar los puntos anatómicos clave del pie mediante procesamiento de imagen y modelos de estimación de pose. Para ello, se diseñó un sistema diseñado en Pycharmin con lenguaje de pythony, mostrado en la Fig. 3. El sistema inicia con un proceso de inicio de sesión destinado al administrador. Una vez autenticado, el administrador accede a una pantalla principal donde se muestra un mensaje de bienvenida, acompañado de estadísticas generales del sistema y un menú de opciones que permite registrar nuevos pacientes, así como gestionar la información existente.

La Fig. 5 muestra el menú principal al que tiene acceso el administrador del sistema. Este se compone de cuatro submenús funcionales que estructuran las principales operaciones de la plataforma: Registrar paciente: permite al administrador ingresar la información básica y los datos físicos del paciente, con el propósito de mantener un registro completo y preciso para futuras consultas o análisis. Pacientes: presenta el historial general de todos los pacientes registrados, incluyendo sus datos previos y las citas previamente atendidas o programadas. Screening: despliega un submenú con los distintos padecimientos podales que el sistema puede evaluar. Desde este apartado, el administrador puede seleccionar una condición específica para su análisis o realizar un escaneo automático mediante el módulo de visión por computadora. Tratamientos: ofrece una guía orientativa de posibles tratamientos asociados a cada padecimiento detectado. Se enfatiza que la información proporcionada tiene carácter educativo y no sustituye la valoración médica profesional, recomendando siempre la consulta con un especialista.

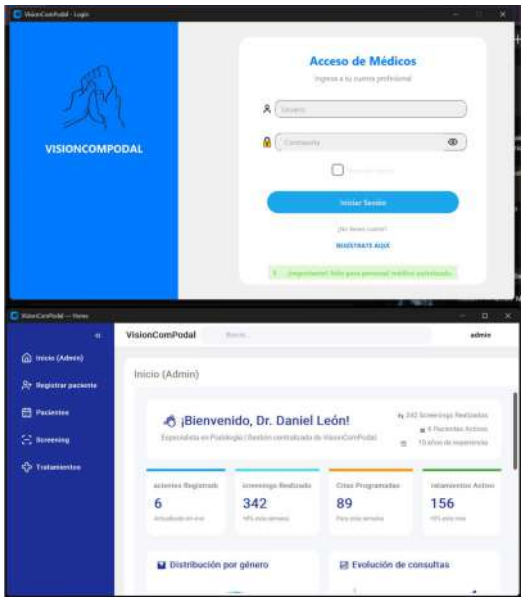


Fig. 3. Ventanas iniciales de VisionComPodal.

4.2 Análisis geométrico y detección de deformidades

La detección del *hallux valgus* en el sistema **VisionComPodal** se realiza mediante un análisis geométrico de los *landmarks* anatómicos obtenidos a partir del modelo *MediaPipe Pose*. En cada captura, el algoritmo identifica las coordenadas del tobillo, la cabeza del primer metatarsiano y la falange proximal del hallux, calculando el ángulo metatarsofalángico formado por los vectores que unen estos puntos. Este parámetro angular constituye un indicador directo de la desviación lateral del primer dedo respecto al eje longitudinal del pie. Si el valor calculado supera un umbral de 15° definido conforme a criterios clínicos documentados, el sistema clasifica automáticamente la muestra como positiva a *hallux valgus*. Además, se realiza una verificación morfológica de la región anterior del pie mediante segmentación y análisis de simetría, lo que reduce los falsos positivos ocasionados por proyecciones o variaciones en la iluminación. Finalmente, el resultado se visualiza en la interfaz con una superposición gráfica que resalta la desviación detectada, mostrando el valor del ángulo estimado y una recomendación terapéutica orientativa. En la Fig. 4 se observa el proceso de instalación del

paquete *Roboflow* en el entorno Python a través de la consola de comandos. Esta etapa fue esencial para establecer la comunicación con la API de la plataforma y posibilitar la incorporación de nuevas imágenes al dataset empleado en el entrenamiento del modelo de detección podal. La Fig. 6 muestra el funcionamiento del módulo de detección del *hallux valgus* en el sistema *VisionComPodal*. La detección se realiza mediante una conexión segura a la API de visión artificial en la nube, autenticada con una *API Key*, que procesa las imágenes con el modelo entrenado en Roboflow. El servicio devuelve las coordenadas anatómicas y valores angulares, los cuales son analizados localmente en Python para estimar el grado de desviación. La interfaz visual superpone los resultados, mostrando el ángulo calculado y una recomendación terapéutica orientativa.

Fig. 4. Instalación de imágenes en el dataset mediante la plataforma Roboflow.

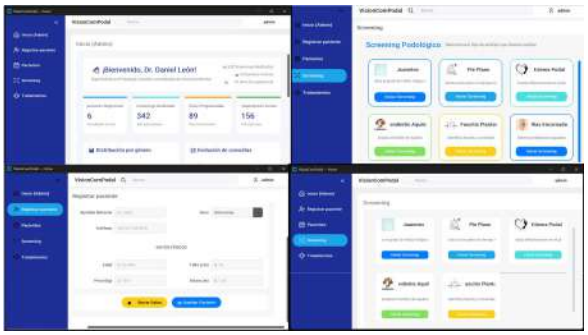


Fig. 5. Menú de la plataforma de VisionComPodal

Fig. 6. Funcionamiento de detección hallux valgus mediante vision por computadora.

5. CONCLUSIÓN

El desarrollo del sistema *VisionComPodal* demuestra la factibilidad de aplicar técnicas de visión por computadora e inteligencia artificial al diagnóstico preventivo de deformidades podales de forma no invasiva. La integración de módulos de detección geométrica y análisis morfométrico permitió identificar con precisión condiciones como el *hallux valgus* y el pie plano, alcanzando niveles de desempeño consistentes en diferentes condiciones de captura. Asimismo, la implementación de una plataforma computacional basada en Python ofrece una herramienta funcional y accesible para el registro, evaluación y seguimiento clínico de pacientes, fortaleciendo el vínculo entre la ingeniería biomédica y la práctica podológica. Sin embargo, el sistema presenta algunas limitaciones asociadas principalmente al tamaño y variabilidad del dataset empleado, lo cual puede afectar la generalización del modelo en escenarios clínicos más amplios. Además, el nivel de precisión actual sugiere la necesidad de un entrenamiento más exhaustivo con imágenes provenientes de distintas fuentes y condiciones de iluminación. También se requiere una mayor optimización del procesamiento de datos para reducir el tiempo de inferencia y mejorar la estabilidad de detección en tiempo real.

Como trabajo futuro, se propone integrar un módulo de control adaptativo con retroalimentación terapéutica y realizar validaciones clínicas en poblaciones más amplias. Estas mejoras permitirán optimizar la respuesta ante deformidades podales y extender *VisionComPodal* al diagnóstico de otros padecimientos comunes del pie.

REFERENCES

Al-Basha, N., Al-Qaysi, Z., and Kamel, M. (2022). Deep learning-based segmentation and classification of foot deformities using cnn models. *Biomedical Signal Processing and Control*, 77, 103776. doi: 10.1016/j.bspc.2022.103776.

Albuquerque, P., Machado, J., Verlekar, T.T., Soares, L.D., and Correia, P.L. (2021). Remote pathological gait classification system. *arXiv preprint arXiv:2105.01634*.

Biz, C. et al. (2023). Flatfoot over the centuries: the background of current pes planus management. *International Orthopaedics*, 47, ... doi:10.1007/s00264-023-05837-3.

Cai, Y., Song, Y., He, M., He, W., Zhong, X., Wen, H., and Wei, Q. (2023). Global prevalence and incidence of hallux valgus: a systematic review and meta-analysis. *Journal of foot and ankle research*, 16(1), 63.

Ekerete, I., Garcia-Constantino, M., Diaz-Skeete, Y., Nugent, C., and McLaughlin, J. (2021a). Fusion of unobtrusive sensing solutions for sprained ankle rehabilitation exercises monitoring in home environments. *Sensors*, 21(22), 7560. doi:10.3390/s21227560.

Ekerete, I., Garcia-Constantino, M., Diaz-Skeete, Y., Nugent, C., and McLaughlin, J. (2021b). Fusion of unobtrusive sensing solutions for sprained ankle rehabilitation exercises monitoring in home environments. *Sensors*, 21(22), 7560.

Han, S., Zhang, Z., and Wang, Y. (2023). Real-time diabetic foot ulcer detection using optimized yolov3 algorithm. *Computers in Biology and Medicine*, 153, 106513. doi:10.1016/j.compbiomed.2022.106513.

Koh, J., Lee, D., and Park, Y. (2020). Deep neural network approach for classification of hallux valgus severity. *Scientific Reports*, 10, 18121. doi:10.1038/s41598-020-75227-7.

López, A., Pérez, L., and Hernández, R. (2022). Integration of plantar pressure and inertial sensors for gait analysis in foot deformities. *Sensors*, 22(7), 2756. doi: 10.3390/s22072756.

Maestre-Rendón, J.R., Rivera-Román, T.A., Sierra-Hernández, J.M., Cruz-Aceves, I., Contreras-Medina, L.M., Duarte-Galván, C., and Fernández-Jaramillo, A.A. (2017). Low computational-cost footprint deformities diagnosis sensor through angles, dimensions analysis and image processing techniques. *Sensors*, 17(11), 2700. doi:10.3390/s17112700.

Martín-Casado, L. et al. (2023). Foot morphology as a predictor of hallux valgus: a cross-sectional study. *Scientific Reports*, 13, ... doi:10.1038/s41598-023-36301-2.

Neumann, D.A. (2010). *Kinesiology of the Musculoskeletal System: Foundations for Rehabilitation*. Mosby Elsevier, St. Louis, MO, 2 edition.

Nix, S., Smith, M., and Vicenzino, B. (2010a). Prevalence of hallux valgus in the general population: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Foot and Ankle Research*, 3, 21. doi:10.1186/1757-1146-3-21.

Nix, S., Smith, M., and Vicenzino, B. (2010b). Prevalence of hallux valgus in the general population: a systematic review and meta-analysis. *Journal of foot and ankle research*, 3(1), 21.

Perera, A.M., Mason, L., and Stephens, M.M. (2011). The pathogenesis of hallux valgus. *Journal of Bone and Joint Surgery (British Volume)*, 93-B(12), 1650–1661. doi:10.1302/0301-620X.93B12.27065.

Pham, T., Tran, H., and Nguyen, Q. (2022). Computer vision applications in medical image analysis: A review. *Artificial Intelligence in Medicine*, 125, 102248. doi: 10.1016/j.artmed.2021.102248.

Salinas-Torres, V.M., Salinas-Torres, R.A., Carranza-García, L.E., Herrera-Orozco, J., and Tristán-Rodríguez, J.L. (2023). Prevalence and clinical factors associated with pes planus among children and adults: A population-based synthesis and systematic review. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*, 62(5), 899–903.

Sarmun, R., Chowdhury, M.E., Murugappan, M., Aqel, A., Ezzuddin, M., Rahman, S.M., Khandakar, A., Akter, S., Alfkey, R., and Hasan, A. (2024). Diabetic foot ulcer detection: combining deep learning models for improved localization. *Cognitive computation*, 16(3), 1413–1431.

Thabet, A.K., Trucco, E., Salvi, J., Wang, W., and Aboud, R.J. (2014). Dynamic 3d shape of the plantar surface of the foot using coded structured light: a technical report. *Journal of foot and ankle research*, 7(1), 5.

Wang, I.L., Wang, L.I., Liu, Y., Su, Y., Yao, S., and Ho, C.S. (2021). Application of real-time visual feedback system in balance training of the center of pressure with smart wearable devices. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 9637. doi:10.3390/ijerph18189637.

Wang, J., Lin, C., and Chang, Y. (2020). Kinematic gait analysis of hallux valgus using inertial sensors. *Gait & Posture*, 82, 258–264. doi: 10.1016/j.gaitpost.2020.09.006.

Yamashita, T., Yamashita, K., Sato, M., Kawasumi, M., and Ata, S. (2021). Foot-surface-structure analysis using a smartphone-based 3d foot scanner. *Medical Engineering & Physics*, 95, 90–96. doi: 10.1016/j.medengphy.2021.08.001.

Zhang, J., Qiu, Y., Peng, L., Zhou, Q., Wang, Z., and Qi, M. (2022). A comprehensive review of methods based on deep learning for diabetes-related foot ulcers. *Frontiers in Endocrinology*, 13, 945020.

Zhang, L.y., Yick, K.l., Yue, M.j., Yip, J., and Ng, S.p. (2023). An exploratory study of dynamic foot shape measurements with 4d scanning system. *Scientific reports*, 13(1), 8628.

Zhang, Z., Li, F., and Xu, J. (2021). Automated foot morphology measurement using deep learning and 3d reconstruction. *Medical Image Analysis*, 73, 102150. doi: 10.1016/j.media.2021.102150.

Zhou, X., Xu, P., and Li, Y. (2023). Multimodal learning for foot deformity assessment using vision and sensor data fusion. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 31(6), 1675–1686. doi: 10.1109/TNSRE.2023.3271328.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Effect of Nanoemulsions for Improving Postharvest Quality and Shelf Life of Papaya (*Carica papaya* L.), to Anthracnose Control (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz and Sacc.)

***** Ricardo Hernández Pérez*, Alfredo Olarte Paredes*, René Salgado Delgado*, Teresa de J. Ramírez Pedraza**, Cinthya Dinorah Arrieta González *, Guadalupe Bravo Silva***.**

*National Technological Institute of Mexico/Technological Institute of Zacatepec, Mexico. Road Tecnológico. No. 27, Zic. 62780, Zacatepec de Hidalgo, Morelos. santaclara57@yahoo.es
** Lab. Agro-diagnosis. "Vir./Bact. Specialist ". Fitolab S.A de C.V. Bugambilia # 9. Col. Mirador de Puxtla. Zic. 62757. [3]Independent Field Technical Engineer. Cuernavaca. Morelos State. Mex. tramirezpedraza@yahoo.com
*** Independent Field Technical Engineer. Cuernavaca. Morelos State. Mex. lupillobs_12@hotmail.com

Abstract: To control of antracnosis in harvested fruits, growers commonly use fungicides. The objective of this work was to evaluate the generation of new protectants, with antifungal properties, in mixtures with nanocellulose, to prevent fruit damage. After evaluating uninoculated fruits from the field (Treatment A), applying nanoemulsions of oregano, lemon, and chitosan, a lower number of spots was observed in all treatments, except oregano, which was similar to the control fungicide. The latter obtained a greater affected area than the other treatments. NanoChitosan was the most effective, differing from NanoLemon oil and Oregano, which were also superior to the fungicide. (Treatment B) Inoculated fruits. The highest number of spots was in the control treatment, which differed from the other protectants, with a lower average for NanoChitosan. Similarly, the largest affected area was in the control, unlike the other nanoproducts, NanoChitosan had the lowest affectation. The highest percentage of inhibition was obtained by Lemon. The highest biological effectiveness was obtained by NanoOregano oil and NanoChitosan, similar to the fungicide control. The highest biological effectiveness was obtained by Oregano and NanoChitosan, similar to control.

Keywords: papaya, anthracnose, nanocellulose, chitosan, oregano and lemon essential oils.

1. INTRODUCTION

Ali et al. (2015) compared the efficacy of a lemon essential oil-based combination with chitosan as an example of an edible coating for pepper. Lemon essential oil at concentrations of 0.5 and 1.0% incorporated into a 0.5 and 1.0% chitosan solution was shown to be a means of controlling pepper anthracnose in vitro and in vivo. Nanocellulose (NC) emerged as a promising material to tailor the properties of coatings in food preservation. Due to its nanoreinforcing effect on many different polymeric matrices, three types of cellulose have been mainly used: cellulose nanocrystals (CNC), cellulose nanofibrils (CNF) and bacterial nanocellulose (BNC) (Pirozzi et al., 2020a).

The use of nanocellulose (NC) in edible coatings for the preservation of perishable fruits and vegetables represents an emerging approach to extend the shelf life of highly perishable foods. The use of reinforcing agents in film-forming solutions to tailor the physicochemical, mechanical and antimicrobial properties of composite coatings has led to recent advances in the incorporation of complex nanoparticles into polymeric matrices for the improvement of coating properties as well as in increasing the shelf life and quality of fruits and vegetables (Pirozzi et al., 2020a).

Recently, the incorporation of essential oils (EOs) as natural antimicrobial agents in edible coatings has received increasing attention to control spoilage and extend the storage life of perishable foods. Oregano essential oil (EO), which is rich in the GRAS monoterpene carvacrol, has excellent antimicrobial properties and inhibits the growth of both gram-positive and gram-negative bacteria and fungi. The addition of AEO nanoemulsion in the coating, providing more hydrophobic sites, further improves the wetting and adhesion capacity of the coating solution to the tomato fruit surface (Pirozzi et al., 2020b).

Nanocellulose (NC) emerged as a promising material to tailor the properties of coatings in food preservation. Due to its nanoreinforcing effect on many different polymeric matrices, three types of cellulose have been mainly used: cellulose nanocrystals (CNC), cellulose nanofibrils (CNF) and bacterial nanocellulose (BNC) (Pirozzi et al., 2020a).

The use of nanocellulose (NC) in edible coatings for the preservation of perishable fruits and vegetables represents an emerging approach to extend the shelf life of highly perishable foods. The use of reinforcing agents in film-forming solutions to tailor the physicochemical, mechanical and antimicrobial properties of composite coatings has led to recent advances in the incorporation of complex nanoparticles into polymeric matrices for the improvement of coating properties as well as in increasing the shelf life and quality of fruits and vegetables (Pirozzi et al., 2020a).

Essential oils from fruit crops, herbaceous crops, spices, among others, are the most studied antimicrobial agents of natural origin, among which allspice (*Pimenta dioica* (L.) Merr.), oregano (*Origanum vulgare* L.), thyme (*Thymus vulgaris* L.), clove (*Syzygium aromaticum* (L.) Merr. & L.M. Perry), cinnamon (*Cinnamomum verum* J. Presl) and lemon (*Citrus × limon* (L.) Osbeck) stand out, whose main constituents are eugenol, thymol, carvacrol, cinnamic

aldehyde and limonene, respectively (Armas-Caballero et al. 2011; Cerutti and Neumayer 2004).
Based on the above, the objectives of these assays were to evaluate the combined effect of natural proteolytic enzymes applied to rice husk, prior to obtaining Cellulose, in addition to verifying the effectiveness of the enzymatic hydrolysis composed of four enzymes: (D -(+)-cellobiose, endo-1,4-β-D glucanase, β-glucosidase and cellobiohydrolase), for the synthesis of (CNCs) with two different procedures.
Based on the initial successful laboratory results for the control of anthracnose in papaya, using mixtures of chitosan (8.7 mg/mL), lemon oil (10 x 10^4 ppm), and oregano oil as nanocomposites.

2. MATERIALS AND METHODS

The research was carried out in the Physical Chemistry laboratory belonging to the Department of Biochemistry and Chemistry of TecNM/ITZacatepec, Morelos, Mexico, from January to September 2025.

2.1 Isolation of fungus.

An isolate of the fungus was extracted from Maradol papaya fruits with characteristic symptoms of anthracnose (superficial, sunken, round or angular lesions, with masses of salmon pink to dark colored conidia). (Swinburne, 1993), from the state of Morelos. Small fractions of symptomatic tissue were cut from the fruit, with dimensions of (1 x 1 cm), previously disinfected with commercial chlorine 0.6% P/V, for 1 min and rinsed with sterilized distilled water. The sowings were made in Petri dishes containing Potato Dextrose Agar (PDA) culture medium (Basulto et al., 2018). The Petri dishes were incubated in an incubator (ICB) at a controlled temperature of 28 ± 2 ºC for a period of three days in darkness (Acosta et al., 2002) to simulate favorable conditions for the growth of the anthracnose fungus.

2.2 Identification of isolates by optical microscopy (OM).

Morphological identification was based on monoconidial cultures, using the taxonomic keys of (Ainsworth et al.,1973); (Barnett et al.,1998) to identify the genus and the references of (Sutton et al.,1992) for the species. The spore size of the isolate was recorded with the length and width of 50 random conidia, with the aid of an optical microscope (Figure 1).

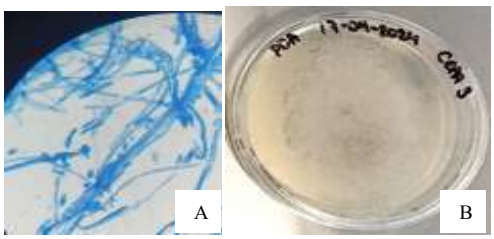


Figure 1. Morphology of *C. gloeosporioides* species. A) Asexual conidia under a 20x microscope, and B) colony development on PDA medium.

2.3 Scanning electron microscope (SEM) observation

The analysis of *C. gloeosporioides* spores was carried out using a scanning electron microscope, model JSM-6010, JOEL, which allowed us to determine and analyze the morphology of the sample obtained from isolation after having been inspected by MO and its pathogenicity evaluated. Each sample on a grid was coated with colloidal gold for two minutes. They were then passed under a microscope to view the images that identified the shape and size of the conidia at 20 Kv (Chau and Álvarez, 1983).

2.4. Formulation and concentration of nanoparticles.

Formulate MF/NC (nanocellulose microfibers) concentrations in sterile water, forming a standard solution at a concentration of 32 mg/ml (Hernandez et al, 2024)

2.5 Treatments applied.

Methodology was followed for comparing an absolute controls and commercial fungicides, taking into account NOM-032-SAG/FITO-2014. The following treatments were used for this test (Table 1).

No.	Treatments	Product	Concentration	Doses
I	NanoLemon oil	Extract oil	10 x10^4 ppm	Low Dose
II	NanoOregano oil	Extract oil	10x10^4ppm	Low Dose
III	NanoChitosan	Granulated Concent.	8.75 mg.ml^{-1}	Medium Dose
IV	Fungicide Control	Commercial fungicide	1x10^3 ppm	According manufacturer
V	Absolut Control	Nanocellulose + Watter	32 mg.ml^{-1}	Hdez et al (2025)

Table 1. Doses of different treatments used in assays.

2.6 Inhibition porcentaje

The percentage of mycelium growth inhibition was calculated by the formula:

$$\%\,I = \left(\frac{Growth\ diametero}{\text{Control diameter}}\right) * 100$$

Where:
% I= Inhibition percentage

Treatment effectiveness

The biological effectiveness of the treatments was calculated using the Abbott formula:

$$ET = \left(\frac{(IT - it)}{IT}\right) * 100$$

Where:
ET=Treatment effectiveness
IT=percentage of inhibition of positive control
it=percentage of inhibition each treatment

3. RESULTS AND DISCUSSION

The final results shown correspond to evaluations made 10 days after application of the nanoemulsions and their controls. Presumably when the fruits have already been damaged by the effects of anthracnose and their quality may be affected.

3.1. Isolation of the pathogenic fungus

Three strains were obtained from papaya (*Carica papaya* L.) and avocado (*Persea americana* L.) fruits, in collaboration

with the Plant Pathology Laboratory of the Center for the Development of Biotic Products (CEPROBI) (IPN). But finally the work carried out was performed with the strain obtained from an avocado fruit, characterized as *Colletotrichum gloeosporioides*. This species has been reported in different cultivars such as papaya, citrus, avocado, coffee, mango, grape, soursop, tomato and strawberry by Beltrán et al. (2006).

3.2 Isolate identification

Optical microscope observations showed the shape of the conidia with Amecloporos characteristics, cylindrical, thin, 8.53 to 15.36 µm long and 3.19 to 5.00 µm wide, characteristic of the species *C. gloeosporioides,* according to Sikirou et al (2011), with unicellular conidia, accepted and oval to cylindrical in shape with round ends and measuring 10 and 20 µm long and between 3 and 5 µm wide (Figure 2).

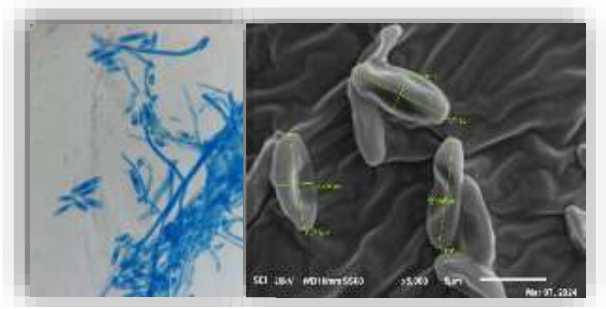


Figure 2. Morphology of *C. gloeosporioides* species. A) Asexual conidia under a 20 x microscope, and colony development on PDA medium. B) Electron microscope image to determine the morphology of *Colletotrichum* conidia, isolation from papaya (*C. papaya*).

3.3. Assessment the effectiveness on papaya fruits

3.3.1 Fruits with natural field infection (Treatment A)

As observed in Figure 3, in non-inoculated plants (Treatment **A**), the number of spots was similar to the control fungicide in all treatments except the nanoemulsion with oregano oil, which were different from the absolute control. However, the difference was marked when chitosan nanoemulsions were used, where there was a significant difference in the affected area (3.1) compared to the fungicide control (9.8) and other treatments.

It should be noted that the use of nanoemulsions with these oils and polymers with nanocellulose allow a better coating of the surface of fruits naturally attacked by this fungus, preventing the damage caused by the fungus from expanding, that is, there may be small spots without causing severe commercial damage, which is evident in the absolute control (15.9) where only water and nanoparticles were used. The polynomial trend line reached (R^2 = 0.9), which accurately indicates the effectiveness of the best applied products such as Nanochitosan and NanoOregano.

Essential oils from fruit crops, herbaceous plants, spices, among others, are the most studied natural antimicrobial agents, among which allspice (*Pimenta dioica* (L.) Merr.), oregano (*Origanum vulgare* L.), thyme (Thymus vulgaris L.), clove (Syzygium aromaticum (L.) Merr. & L.M. Perry), cinnamon (*Cinnamomum verum* J. Presl) and lemon (*Citrus* × *limon* (L.) Osbeck) stand out, whose main constituents are eugenol, thymol, carvacrol, cinnamic aldehyde and limonene, respectively (Armas-Caballero et al. 2011; Cerutti and Neumayer 2004). Although contrary to these results, Morales-Chávez et al. (2024) did not observe inhibition of this pathogen *in vitro* against lemon essential oil.

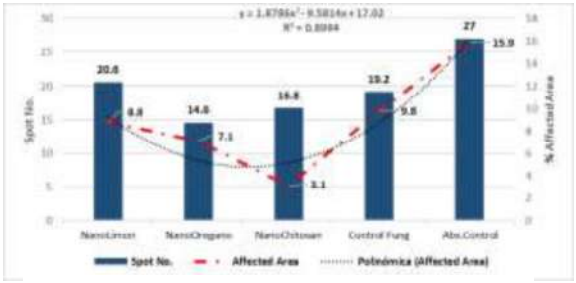


Figure. 3. Preventive applications of nanoemulsions on papaya fruit in Treatment A (uninoculated plants). Statistical analysis of the number of spots and percentage of affected area. Identical letters in the same column have no statistical difference.

Regarding the porcentaje inhibition (Figure.4), in uninoculated fruits with fungus showed, highest percentage obtained by fungicide (Amistar) (61.7), different from all the applied nanoproducts. This is an evaluation that is generally applied to measure the development of the pathogen in *in vitro* conditions from the mycelia diameter, in this case it was applied to compare the size of the spots with respect to the absolute control.

Although it is not an absolutely reliable value due to its subjectivity, it shows higher and different values in the nanoemulsions with respect to the control fungicide (61.7). Inversely proportional, the biological effectiveness was high with NanoChitosan (80.1) being the most effective, as required by NOM-032-SAG / FITO-2014 (SAGARPA, 2016).

Others as NanoLemon (44.5) and NanoOregano (44.7) also had higher values than the control fungicide (38.2). The polynomial trend line established for the biological effectiveness of the products coincides with a % probability with NanoChitosan being superior to the applied fungicide.

The addition of antimicrobial agents to the coating solution is reported to develop a synergistic action with the physical barrier of the coating. Moreover, the incorporation in the coating layer might also enable the controlled release of the antimicrobial molecules on the food surface ((Skurtys et al. (2010); Vojdani and Torres (1990); Zactiti and Kieckbusch (2009)), contributing to improving the shelf-life of the product, by inhibiting the growth of bacterial and fungal cells over an extended time. The incorporation of such natural compounds into edible coatings enables the development of active coatings, which combine physical protection of the food product (barrier effect) with significant antimicrobial activity.

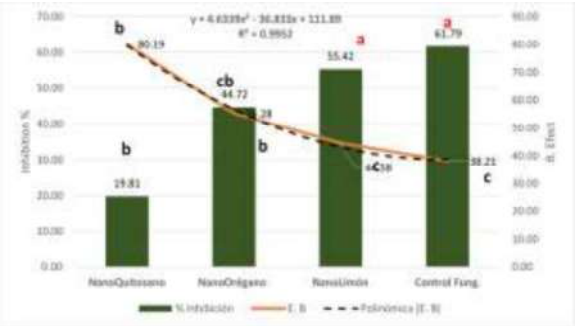


Figure 4. Nanoemulsions effect against natural anthracnose infections in fruit Treatment A. Analysis of % inhibition and biological effectiveness (BE) with natural infection fruits. Identical letters in the same column have no statistical difference.

Pirozzi, et al (2021) in review summarized the recent advancements about the incorporation of nanocellulose (NC) in a polymeric matrix to form edible coatings (ECs). Unlike NC used alone, which forms a coating with poor resistance to water vapor, the reinforcement of conventional coatings through the NC addition in the coating formulation is reported to significantly improve the ECs' properties. Remarkably, it was shown, through the critical analysis of the literature, how the properties of nanocomposite coatings, based on NC reinforcement, change depending on which type of NC (cellulose nanocrystals—CNC, or cellulose nanofibrils—CNF) and concentration are used.

Therefore, the ECs' structural and chemical properties can be tailored through formulation, in combination with the selection of the optimal coating deposition technique.

Most of the studies to date have focused on the incorporation of CNC in coating solutions, because their high-crystallinity structure may increase the mechanical resistance (e.g., the tensile strength), as well as the barrier performance of the coatings. However, CNC are reported to condense in the film-forming solutions, when their concentration is excessively high, with a consequent increase in water vapor permeability and a decrease in elongation at break value in the resulting coatings. In contrast, the use of CNF was reported to confer a more flexible structure to the coatings, due to their individual or aggregated softer and longer chains than CNC. The conflicting results reported, to date, about the effect of CNF on the properties of nanocomposite coatings, CNF has not been widely studied as a reinforcing agent. Bacterial nanocellulose (BNC) has recently emerged as a potential additive in ECs, because of its purity, which is reported to contribute to high tensile strength and mechanical flexibility to the coatings.

3.3.2 Inoculated fruits after harvesting (Treatment B)

As observed in Figure 5, the control had the highest number of spots (44), which was different from the others nanoemulsions. NanoOregan (17), was different to NanoLemon (25). But without differences with NanoChitosan (20) and fungicide control (23), that obtained the lowest average, did not differs between those. Similar results, were found when anthracnose was naturally present in the field.

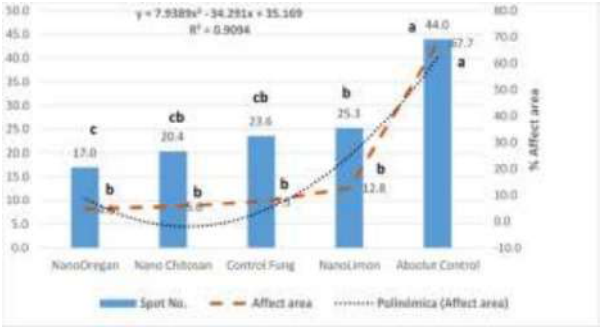


Figure 5 Applications of nanoemulsions on papaya fruit Treatment B (fruits/inoculated). Statistical analysis of the number of spots and percentage of affected area. Identical letters in the same column have no statistical difference.

When we analyze the affected area, the Control had the largest affected area (67), which was different from the other nanoproducts, with the lowest affectation NanoOregan (4.5) and NanoChitosan (5.6), Control (7.5) and NanoLimon (12) but did not differs between those.

According to Figure 6, the highest percentage of inhibition was obtained when NanoLimón was applied (18.9%). The other treatments were below the control fungicide (11.1%). Correspondingly, the biological effectiveness of all was above (90%), except for NanoLimón, which reached 72%. Although this can be considered acceptable for an organic product, it did not live up to the fungicide used in the test. These results are very similar to those obtained by (Pérez et al., 2017), who reported that Limon oil obtained acceptable control of up to 78% with the medium dose, corroborating the high antifungal index percentages obtained with *Cymbopogon citratus* (Limoncillo) against *C. gloeosporioides*, similar to the effect of Benomyl 1 g. L^{-1}, used as a positive control.

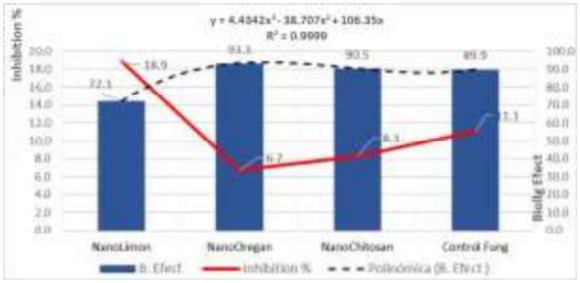


Figure 6. Applications of nanoemulsions on papaya fruit Treatment B (fruits/inoculated). Analysis of % inhibition and biological effectiveness (BE), fruits with infection caused. Identical letters in the same column have no statistical difference.

While, Barroso-Ake et al. (2021) stated that citronella could be a biological alternative for *in vitro* control of the fungus at low doses, considering it a promising bioactive that could be considered for the control of this phytopathogen in avocado. Contrary to the above, lemon essential oil was not effective against *C. gloeosporioides*; while cinnamon and thyme essential oils showed fungicidal effects at 0.1 percent concentrations, with plate growth inhibition of 98.1 and 97.76 percent and spore reduction of 66.67 and 56.67 percent, respectively (Morales-Chávez et al., 2024).

Tests with oregano oil, were poor at controlling this microorganism, contrary to what was reported by Escalona-Lujano et al. (2021) when testing the effect of two oregano-based fungicides (Ganore and Fungol), to control *C. gloeosporioides*, which achieved 100% inhibition in papaya fruits.

3.4. Effect of nanocellulose coating on fruit preservation

Figure 7 shows the effectiveness of nanoemulsions applied to fruit after 10 days. As can be seen, the absolute control treatment (V), which only included water and nanocellulose had no effect on natural *C. gloeosporioides* infections, so considerable damage and countless stains were observed on the epidermis of the few surviving fruits. While, as explained above in both Treatments A and B, the Nanochitosan (III), allowed the fruit to be stored in better marketable conditions, even when still green. Followed, by NanoLemon oil (I) and NanoOregano oil (II), which managed to protect the fruit similarly to the Control Fungicide (IV). In some fruits when NanoOregano was applied, a certain change in coloration could be perceived in the epidermis of fruit, which can be interpreted as a toxicity that could be managed if a lower dose were used.

In this regard, we agree some authors such as Pirozzi, *et al* (2020a) when they explained that, the application of edible coatings (EC) in combination with pulsed light (PL) treatments represents an emerging approach for extending the shelf life of highly perishable but high value-added products, such as fresh-cut fruits and vegetables.

As a recent trend, it must be remarked that natural coating materials are increasingly attracting the interest of reserchers, as shown by the wide use of Aloe vera gel and other natural polysaccharides, such as chitosan or seaweed extracts, which exhibit an intrinsic antimicrobial activity, significantly contributing to extending the product shelf life. The tendency toward natural products are also confirmed by the wide use of natural gums, starches, cellulose, and its derivatives and other compounds recovered from agri-food residues (Pirozzi et al, 2021). Overall, the incorporation of NC in ECs represents a promising approach for improving ECs' mechanical and barrier properties, stability and eventual controlled release of active agents, with a potential impact in the preservation of the quality and extension of the shelf life of perishable fruits and vegetables with all-natural systems.

Figure 7. Images of fruits from different Nanoemulsions treatments show the fruit color and damage caused by *C. gloeosporioides*: I) NanoLemon oil, II) NanoOregano oil, III) NanoChitosan, IV) Fungicide Control.

6. CONCLUSIONS

The biological effectiveness (BE) in the field for post-harvest control of Anthracnose in papaya fruits was demonstrated after evaluating fruits with natural infection from field (Trat A) and fruits inoculated (Trat B) with anthracnose isolate (C3). After applying nanoemulsions of NanoOregano oil, NanoLemon oil, and NanoChitosan to naturally infected fruit, the number of spots was reduced in all treatments when compared to the control fungicide. The emulsion with chitosan was more effective, differing from the mixtures with lemon and oregano, although these were also superior to the commercial fungicide. In Treatment B, with high inoculum pressure, the highest number of spots was obtained in the commercial control, which differentiated it from the other protectants. In correspondence, the biological effectiveness of all was above (90%), except for NanoLimón oil, which reached 72%.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Conacyt for the scholarship awarded for the Postdoctoral Stay through the project Ref. 6401 and the General Direction of ITZacatepec (TecNM), for the support the execution of the project. Also to Dr. Elizabeth Flores from Plant Pathology Laboratory of Center Development of Biotic Products (CEPROBI) (IPN), for your valuable collaboration in the isolated fungus.

REFERENCES

Acosta Ramos, M., Nieto Ángel, D., Nieto Ángel, R., Mena Nevárez, G., Téliz Ortiz, D., Vaquera Huerta, H., & Delgadillo Sánchez, F. (2002). Comportamiento de la Pulpa Negra y su Efecto en la Calidad de Frutos de Mango (Mangifera indica L.) cv. Haden a Diferentes Temperaturas Postcosecha. Rev. Mexicana de Fitopatología, 20(1), 31-39.

Ali B., Al-Wabel, N.A Shams, S. Ahamad, A. Khan S.A., Anwar F. (2015). Essential oils used in aromatherapy: A systemic review Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 5 (8) (2015), pp. 601-611.

Armas-Caballero C, Márquez-Villacorta L, Pretell-Vásquez C. (2011). Efecto del aceite esencial de clavo de olor (*Syzygium aromaticum*), canela (*Cinnamomum zeylani* cum) y su combinación sobre la acción antifúngica en Aspergillus flavus en agar chicha de maíz (*Zea mays* L.), variedad morado. Pueblo Continente 22: 123-132.

Ainsworth, G. C., Sparrow, F. K., & Sussman, A. S. (1973). The fungi. An Advanced Treatise. (4), 621. Academic Press.

Barroso-Ake, A. C., Ochoa-Fuentes, Y. M., Chávez, E. C., Tucuch-Pérez, M. A., Olalde-Portugal, V., & Robles-Yerena, L. (2021). Manejo in vitro de antracnosis (*Colletotrichum acutatum* Simmonds) en aguacate mediante el uso de principios activos botánicos. Ecosistemas Recursos Agropecuarios(Impresa)/Ecosistemas Y Recursos Agropecuarios. https://doi.org/10.19136/era.a8n2.3038

Barnett, H. L., & Hunter, B. B. (1998). Illustrated genera of imperfect fungi. (208). American Phytopathological Society Press.

Beltrán, C. M. C., & García, J. D. J. (2006). *Colletotrichum gloesporioides* fitopatógeno asociado a la nutrición humana. Investigaciones Andina, 8(13), 73-80.

Cerutti M, Neumayer F. (2004). Introducción a la obtención de aceite esencial de limón. Invenio 7: 149-155.

Chau K. F. and Álvarez A. M. (1983). A histological study of anthracnose on Carica papaya. Phytopathology 73:1113-1116.

Escalona-Lujano, E. C., Goyo-Morillo, Y., González, M. T., Molina-Quintero, L., & Álvarez-Lujano, F. J. (2021). Evaluación de dos fungicidas orgánicos para el control de la antracnosis en la lechosa (*Carica papaya* L.) y su calidad postcosecha. Agroindustria, Sociedad Y Ambiente, 1(8), 67 - 88.https://revistas.uclave.org/index.php/asa/article/view/3397

Hernández, P.R, Salgado, R. D., Olarte A., Salgado, A. M. D., Flores, B. A., & Silva, O. A. (2024). Combined Hydrolysis to Yield Increase of Cellulose and (CNCs), Starting from Agro-industrial Rice Husk Waste in Morelos, Mexico. J. Water Environ. Nanotechnol., 9(2): 124-136 Spring. https://doi.org/10.22090/jwent.2024.02.01.

Morales-Chávez F.M., Rodríguez-Núñez JR., Morales-Vargas A.T., Rodríguez-Núñez J.R., Mariscal Amaro L.A., Núñez-Colín C.A. (2024). Efecto inhibitorio *in vitro* de aceites esenciales contra *Colletotrichum gloeosporioides*. Acta Agrícola y Pecuaria 10: e0101008. https://doi.org/10.30973/aap/2024.10.0101008

Núñez-Colín CA. 2018. Análisis de varianza no paramétri ca: un punto de vista a favor para utilizarla. Acta Agrícola y Pecuaria 4: 69-79. https://doi.org/10.30973/aap/2018.4.3/1.

SAGARPA. (2016) Norma oficial mexicana nom-032-sag/fito-2014, por la que se establecen los requisitos y especificaciones fitosanitarios para la realización de estudios de efectividad biológica de plaguicidas agrícolas y su dictamen técnico. **https://www.norlexinternacional.com/arch/N032TO95.htm**

Pérez Cordero, A. F., Chamorro Anaya, L. M., Vitola Romero, D. C., & Hernández Gómez, J. M. (2017). Actividad antifúngica de *Cymbopogon citratus* contra *Colletotrichum gloeosporioides*. Agronomía Mesoamericana: PCCMCA, Programa Cooperativo Centroamericano de Mejoramiento de Cultivos y Animales, 28(2), 465. https://doi.org/10.15517/ma.v28i2.23647.

Pirozzi, A., Pataro, G., Donsì, F., & Ferrari, G. (2020a). Edible Coating and Pulsed Light to Increase the Shelf Life of Food Products. Food Engineering Reviews, 13(3), 544-569. https://doi.org/10.1007/s12393-020-09245-w

Pirozzi, A.; Del Grosso, V.; Ferrari, G.; Donsì, F. (2020b). Edible coatings containing oregano essential oil nanoemulsion for improving postharvest quality and shelf life of tomatoes. Foods, 9, 1605. https://doi.org/10.3390/foods9111605

Pirozzi, A.; Ferrari, G.; Donsì, F. (2021). The Use of Nanocellulose in Edible Coatings for the Preservation of Perishable Fruits and Vegetables. Coatings, 11, 990. https://doi.org/10.3390/coatings11080990 .

Vojdani, F.; Torres, J.A. (1990). Potassium Sorbate Permeability of Methylcellulose and Hydroxypropyl Methylcellulose Coatings: Effect of Fatty Acids. J. Food Sci. 55, 841–846.

Sikirou, R., Beed, F., Hotègni, J., Winter, S., Assogba-Komlan, F., Reeder, R., & Miller, S. A. (2011). First report of anthracnose caused by *Colletotrichum gloeosporioides* on onion (Allium cepa) in Bénin. New Disease Reports, 23, 7. https://doi.org/10.5197/j.2044-0588.2011.023.007

Sutton, B. C. (1992). The genus Glomerella and its anamorph Colletotrichum. In: Colletotrichum: biology, pathology and control. (pp. 1-26). CAB International.

Swinburne, T. R. (1993). Colletotrichum: Biology, Pathology and Control, eds J. A. Bailey & M. J. Jeger. xii + 388 pp. Wallingford: CAB International (1992). ISBN 0 85198 756 7. J. of Agricultural Science, 121(1), 136–137. https://doi.org/10.1017/s0021859600076929

Zactiti, E.M.; Kieckbusch, T.G. (2009). Release of potassium sorbate from active films of sodium alginate cross linked with calcium chloride

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Social, economic and environmental impact of blueberries

Huesca Mariño, José Manuel*

**TecNM- Instituto Tecnológico Superior de la Sierra Norte de Puebla. Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable. C.P. 73310. (Tel: 797-975 1694; e-mail: manuel.huesca@zacatlan.tecnm.mx).*

Abstract: It is important to understand the social, economic, and environmental indicators generated by blueberry (*Vaccinium sect. Cyanococcus*) production through a systemic, empirical, and critical research approach with a mixed-methods focus and an exploratory scope, as this allows for the evaluation of the crop's sustainability within a community. As a result of this study, economic and social benefits have been generated for families and surrounding communities; however, the environmental impacts are generally considered negative from the population's perspective, thus presenting an opportunity to implement sustainable community strategies to protect available natural resources for future generations.

Keywords: blueberry production, environmental indicator, economic indicator, social indicator, impact of blueberries, Xoxonacatla.

1. INTRODUCCIÓN

Derivado del crecimiento en hectáreas dedicadas al cultivo del blueberry en varias comunidades del municipio de Zacatlán, se ha observado cambios sociales, económicos y del medio ambiente en la comunidad de Xoxonacatla, sin la certeza del nivel de impacto positivo o negativo que se tiene desde la perspectiva de la misma población. Es importante conocer los beneficios sociales que han surgido con el éxito del blueberry, así como tener una visión del impacto económico en los habitantes de la comunidad y el impacto en el medio ambiente observado por los habitantes de Xoxonacatla.

Desde una perspectiva teórica, los indicadores "representan importantes herramientas en la toma de decisiones, ya que transmiten información científica y técnica que permite transformar a la misma en acción, fundamentales para evaluar y predecir tendencias de la situación de una región o una localidad en lo referente a las cuestiones económicas y sociales" (López & Gentile, 2008).

Una de las definiciones más utilizadas para los indicadores es que son "estadísticas, serie estadística o cualquier forma de pronóstico que nos facilita estudiar donde estamos y hacia donde nos dirigimos con respecto a determinados objetivos y metas, así como evaluar programas específicos y determinar su impacto" (Horn, 1993).

El objetivo es conocer el impacto social, económico y ambiental generado por la producción del blueberry (*Vaccinium sect. Cyanococcus*) para detectar los beneficios y oportunidades en el desarrollo de una comunidad.

2. METODOLOGÍA

En la comunidad rural de Xoxonacatla localizada a 8.5 km al Noroeste del municipio de Zacatlán en la Sierra Norte del Estado de Puebla, con un clima templado húmedo y a una altura promedio de 1,700 m.s.n.m., se realizó una investigación básica de junio del 2023 a junio de 2025 con la garantía de la participación voluntaria y resguardo ético de los datos, mediante recorridos de campo a parcelas de blueberry, entrevistas con líderes de la comunidad y encuestas con cuestionario estructurado a una muestra de 68 representantes de la población en general por medio de la técnica "bola de nieve" (Alloatti, 2014).

Se utilizo la estadística descriptiva en el análisis de los datos con base en las medias obtenidas para comparar el impacto antes y actualmente por el cultivo de blueberry, para conocer de diversas cosmovisiones el impacto de los indicadores sociales, económicos y del medio ambiente que han observado.

3. RESULTADOS

Los productores de la comunidad, tienen en promedio 11 años de experiencia en el manejo del cultivo del blueberry, se tiene a un productor con 40 años de experiencia y productores de recién incorporación con 2 años de experiencia, pero todos los entrevistados mayores de 18 años de edad. La variedad de blueberry que llegó desde hace más de 30 años es conocida como "ojo de conejo" y se trabaja en un 91% de las huertas hoy en día.

Un dato interesante es que el 34% de los entrevistados en la comunidad de Xoxonacatla tienen como máximo grado de estudios la primaria, y el 37% de los entrevistados han terminado la secundaria, es decir, la mayoría de los pobladores tienen por lo menos concluida la educación básica.

Los productores y productoras de blueberry de la comunidad de Xoxonacatla tienen en promedio 2.16 hectáreas, encontrando al productor con la mayor cantidad con 3.5 ha y el productor con menor cantidad tiene 0.25 ha, por lo que todos son pequeños productores de este cultivo.

Las huertas no cuentan con sistemas de riego, porque la variedad de la planta "ojo de conejo" está adaptada al clima y suelo de la comunidad, por lo tanto, es un cultivo de temporal.

Una ventaja de Xoxonacatla, es que forma parte de la sierra norte del estado de Puebla, ubicada en una zona húmeda cálida y con bosques, lo que favorece a no necesitar actualmente algún tipo de sistema de riego.

Los productores mencionan que la temporada de cosecha se da en promedio en los meses de mayo, junio y julio, y obtienen un rendimiento promedio de 3.5 toneladas por hectárea.

3.1 Indicadores sociales antes de la producción exitosa del blueberry

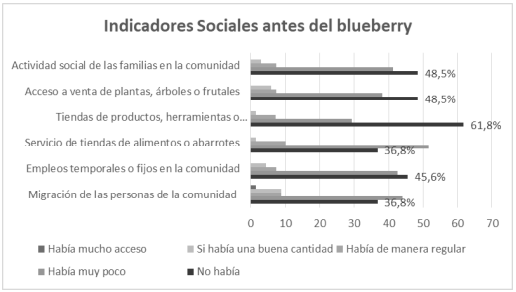
Los indicadores o variables sociales en una población son utilizados para medir y evaluar el bienestar social de una comunidad. Estos indicadores proporcionan información sobre diferentes aspectos de la vida social, como educación, salud, economía, seguridad, entre otros.

Para este indicador, se obtuvo que el 50% de la población entrevistada entre productores y no productores de blueberry, opinan que no tenía acceso o no había servicios de Educación, de Salud, de Seguridad Pública y no podían mejorar o hacer crecer sus viviendas. El 69% de la población no tenía acceso a los servicios de información y comunicación como el internet, red telefónica, luz eléctrica entre los principales servicios. No existían hoteles o el servicio de renta en la comunidad.

La población de la comunidad tenía muy poco acceso a una alimentación balanceada (plato del buen comer) y no tenían acceso a las actividades recreativas como salir a fiestas, ferias, pasear en familia o simplemente visitar a sus familias fuera de la comunidad, así como no poder crear alguna asociación por falta de capacitación o asesorías al respecto.

En este sentido, el 90% de la población no tuvo acceso a un tipo de apoyo por parte del gobierno o por parte de alguna Institución, es decir, no tuvieron algún tipo de beca o capacitaciones asociadas a un determinado cultivo.

Con respecto a la variable de "Migración", más del 70% de la población de Xoxonacatla opina que éste indicador era muy alto, ya que no existían otras oportunidades de empleo en la comunidad, por lo que tenían que buscar un empleo a la ciudad más cercana o en muchos casos tenían que irse por temporadas fuera del estado de Puebla (ver Gráfica 1).



Gráfica 1. Impacto social antes del blueberry.

En consecuencia a la falta de empleos, las familias no podían tener acceso a diversos productos de abarrotes, a herramientas o productos agrícolas, así como no realizar compras de plantas de algún tipo para fortalecer sus huertas, en primera instancia por falta de recurso económico y porque no había establecimientos que ofrecieron estos servicios a la comunidad.

En general, los principales aspectos sociales no existían o no se tenía acceso, como se observa en la siguiente gráfica.

3.2 Indicadores sociales actualmente.

Derivado del éxito del blueberry, muchos productores de Xoxonacatla se han incorporado al manejo de este importante cultivo y con ello, han mejorado de manera importante muchos aspectos sociales (indicadores). Entre el más importante desde el punto de vista de los habitantes de la comunidad, es el acceso al servicio de la "educación", ya que han aumentado las escuelas o su infraestructura, lo que ha permitido recibir a más estudiantes en todos los niveles.

Al mismo tiempo, ha aumentado los servicios de salud para la comunidad en más de un 40% en comparación de hace 30 años, así como el surgimiento de farmacias, consultorios particulares y veterinarias.

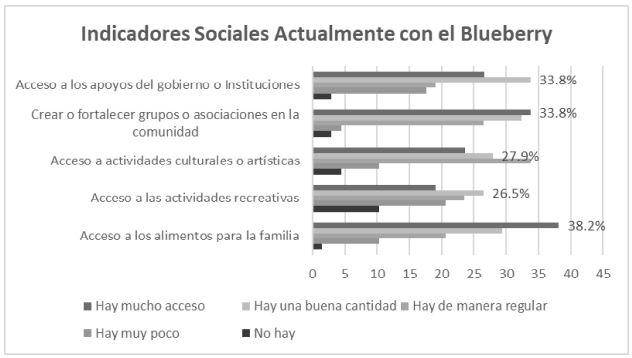
Muchos servicios han aumentado, pero un dato interesante es que casi el 30% de la población considera que aún no hay servicios de seguridad pública adecuados y que permita a la comunidad vivir sin problemas de inseguridad como robos y extorsión principalmente.

El acceso a la vivienda, mejora o ampliación de las viviendas es un indicador que se ha visto con un impacto positivo, ya que el 42% de la población ha tenido la oportunidad de construir nuevas casas o ampliar sus casas. Ha incrementado un 20% el servicio de hospedaje en la comunidad y se le ha dado mantenimiento al 36% de los caminos y calles de la comunidad. Así mismo ha crecido en un 38% los servicios de internet, telefonía y sistemas de comunicación o entretenimiento. Finalmente, el 41% de la población ha tenido acceso a capacitación en alguna actividad sobre el manejo del blueberry.

Uno de los indicadores sociales importantes es tener los servicios de alimentación, los cuales han aumentado en un 38% en comparación de hace más de 30 años. Al mismo tiempo, el 27% de la población ha tenido acceso a una buena cantidad de actividades recreativas, culturales y artísticas.

Adicionalmente el 33% de la población ha tenido acceso y apoyo para crear un grupo o asociación de productores de blueberry y han recibido diferentes apoyos del gobierno e instituciones como: capacitaciones, talleres, conferencias, asesorías, insumos, foros, visitas de investigadores y expertos en diferentes temas relacionados al manejo del cultivo de blueberry (Gráfica 2).

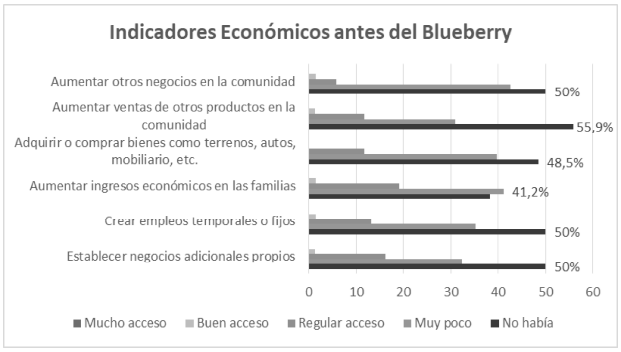
Por otro lado, ha mejorado sustancialmente el tema de la migración, ya que el 36% de la población considera que los habitantes ya no salen de Xoxonacatla a buscar empleo o nuevas oportunidades de generar ingresos, porque el cultivo del blueberry les ofrece muchas actividades agrícolas, de comercialización y capacitación durante la mayor parte del año. Han crecido en más del 35% comercios, tiendas y negocios tanto para venta de diversos alimentos, como productos, herramientas y plantas relacionadas al blueberry.



Gráfica 2. Impacto social actualmente

Para este indicador, se puede concluir que actualmente ha mejorado significativamente los aspectos sociales en la comunidad, en comparación con los datos proporcionados cuando no se trabajaba el cultivo del blueberry.

3.3 Indicadores económicos antes del blueberry.



Gráfica 3. Impacto económico antes del blueberry

Hace algunas décadas que no se tenía como principal cultivo el blueberry, más del 48% de los habitantes no tenían acceso a la educación, y había muy pocas escuelas sólo para nivel básico. El 47% de la población no tenía acceso a los servicios de salud y el 61% de los entrevistados mencionan que no había farmacias o consultorios médicos en la comunidad. Así mismo, más del 80% de los entrevistados mencionan que no había seguridad pública en primer lugar por ser una comunidad rural con mínima cantidad de infraestructura, casi nulo comercio local, todo por no existir una economía favorable en la comunidad.

El 67% de los habitantes de la comunidad opinan que no había solvencia económica en las familias para tener acceso a cursos o talleres de capacitación para aprender el manejo del blueberry, sin embargo, los pocos habitantes que iniciaron en este cultivo hace más de 3 décadas, compartieron o enseñaban a sus vecinos, amigos o familiares mediante prácticas en sus propias parcelas como "módulos demostrativos".

En la Gráfica 3, se observa que en estos inicios del blueberry, el 66% de las familias de Xoxonacatla mencionan que no tenían capital para invertir en servicios como telefonía, internet, sistemas de TV, entre otros servicios.

Más del 50% de los encuestados consideran que antes de la implementación del blueberry, no tenían recurso económico para dar mantenimiento a los caminos, no tenían para invertir en sus viviendas o para construir nuevas.

El 54% de los encuestados aseguran que realizaban muy pocas compras de alimentación (plato del buen comer) para sus familias y el 52% de los habitantes no tenían la economía suficiente para pagar por actividades recreativas como viajar fuera de Xoxonacatla. También la mayoría de la población no tenía los recursos económicos para crear una asociación agrícola y comprar materiales o herramientas agrícolas para las actividades en sus cultivos.

Desde la opinión del 50% de los habitantes tanto productores de blueberry como no productores (as), afirman que no había "negocios" en la comunidad, por lo tanto, no había empleos u otras actividades económicas que les permitieran generar más ingresos durante el año (Gráfica 3). De manera general, casi el 50% de los encuestados afirman no tenían el recurso económico para comprar algún bien material como un automóvil, un terreno, mobiliario o poder crear un negocio. Además, el 35% de la población afirma que había muy poca oportunidad para generar otras actividades económicas en beneficio de los habitantes.

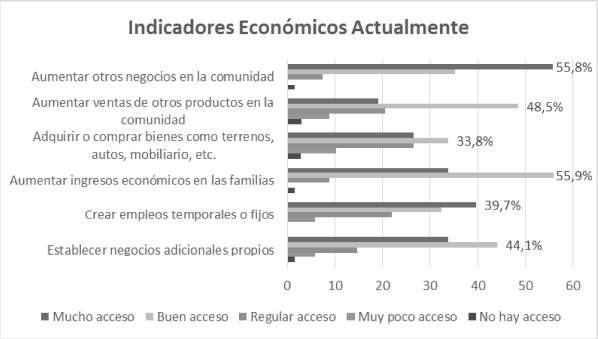
Se puede concluir en este indicador, que la economía en la comunidad estaba limitada, y por consecuencia no se tenia acceso a diferentes servicios básicos como la salud, alimentación, seguridad, comercialización, entre otros.

3.4 Indicadores económicos actualmente.

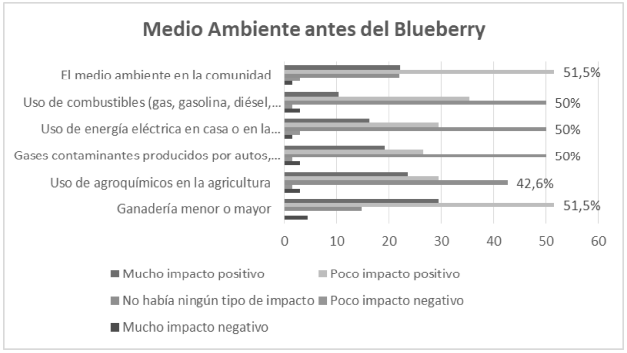
Entre un 20% y 42% de la población de Xoxonacatla considera que tienen una economía buena para pagar servicios como: educación para los integrantes de la familia, mayor acceso a diferentes servicios de salud, comprar medicamentos o pagar consultas médicas incluyendo veterinarios. Más del 35% de los habitantes evalúan sus condiciones económicas muy buenas para poder tener la oportunidad de estudiar Licenciaturas o Posgrados como se muestra en la Gráfica 4.

El 30% de los habitantes evalúa contar con buena economía para: construir nuevas casas o invertir en sus viviendas, mejorar sus caminos y calles, pagar más servicios como el internet, telefonía, sistemas de TV, entre otros, así como pagar cursos o talleres de capacitación para el manejo de las diferentes etapas del cultivo de blueberry. Cerca del 25% de la población considera que ha mejorado mucho su economía gracias al blueberry, por lo que pueden pagar mayor cantidad de servicios.

En la misma Gráfica 4, se observa el aumento en 33.8% en la compra de herramientas y materiales agrícolas y con un 32.4% la compra de alimentos para la familia (plato del buen comer). Mejoró de manera regular con un 39% el asistir a actividades recreativas como viajar en familia, asistir a eventos culturales, eventos artísticos fuera de la comunidad y mejoró un 32% la capacidad para crear asociaciones agrícolas para capacitación y comercialización de las cosechas en beneficio de los productores de blueberry de la propia comunidad y de comunidades alrededor de Xoxonacatla.



Gráfica 4. Impacto económico actualmente



Gráfica 5. Impacto del medio ambiente antes del blueberry

También se observa en la gráfica 4, que actualmente uno de los principales beneficios del blueberry en la comunidad es una ecomonía estable para las familias de la comunidad, ya que más del 85% de la población mejoró sus ingresos económicos por las ventas del blueberry, así como también por el incremento de empleos en la propia comunidad y en las comunidades alrededor de Xoxonacatla, generando más negocios familiares.

3.5 Indicadores del medio ambiente antes del blueberry.

El 40% de la población afirma que hace más de 3 décadas cuando no se tenía el cultivo del blueberry, no había algún tipo de impacto sobre la disponibilidad y cantidad de agua durante todo el año. Tenían grandes bosques, había diversidad de cultivos básicos, frutales de la región como manzana, pera, durazno, ciruela y gran diversidad de plantas aromáticas y pastos que permitían con cierta facilidad el manejo de ganadería.

En la Gráfica 5 se observa, que más del 55% de los encuestados afirman que no había pérdida del paisaje y al mismo tiempo existía diversidad de insectos benéficos como las abejas, colibríes, mariposas, escarabajos, palomas y variedad de aves como parte de los polinizadores más importantes de la región.

El 40% de la población afirma que había muchas especies de animales silvestres, había excelente calidad del aire y se generaba muy poca basura orgánica e inorgánica. Se tenían las condiciones para la producción de una buena variedad de alimentos básicos además del maíz, frijol, haba, calabaza, hortalizas de temporada, se cosechaban hongos silvestres comestibles y cazaban animales del bosque como parte de la alimentación familiar.

El uso de combustibles y derivados del petróleo tienen un impacto considerable al medio ambiente, por lo que en la Gráfica 5 se observa que para el tipo de cultivos que se trabajaban y por la cantidad de bosques que se tenían, no se observaba un impacto negativo al medio ambiente.

De manera general, el 51.5% de la población evalúa que no tenían un impacto negativo en el Medio Ambiente de la comunidad y sus recursos naturales (Gráfica 5).

3.6 Indicadores del medio ambiente actualmente.

Después de más de 3 décadas, el cultivo de blueberry es el más popular, es el más rentable y el de mayor crecimiento en la comunidad de Xoxonacatla a tal grado que muchas comunidades alrededor y con diferentes condiciones edafoclimaticas están adoptando este importante cultivo, de temporal, manejado agroecológicamente buscando la certificación del cultivo en orgánico y con la variedad "ojo de conejo".

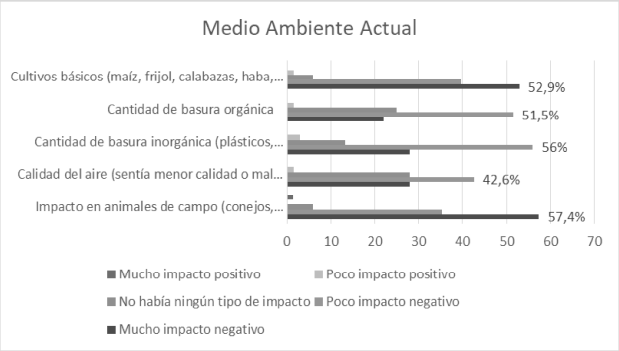
Actualmente los recursos naturales y el medio ambiente en general se ven afectados por este cultivo de manera negativa en la cantidad, calidad, irregularidad de lluvias en el año y la cantidad de agua pluvial en las temporadas establecidas.

Los bosques se han talado y sustituido por plantas de blueberry y con esto han disminuido los servicios ecosistémicos que nos ofrecen, desde un equilibrio en las lluvias, ríos y nacimientos de agua, flora y fauna propia de los bosques que nos proporcionan alimentos, incluyendo la disminución de ciertos polinizadores, afectando adicionalmente el paisaje rural.

En la Gráfica 6, se puede observer que más del 50% de la población afirma que hoy en día se tiene un impacto negativo hacia el medio ambiente, como en la disminución en la cantidad de animales de campo como los conejos, liebres, ardillas, mapaches, cacomixtle, zorros, armadillos, serpientes, ratón de campo, entre otros. Se ha abandonado el policultivo como una fuente de producción de alimentos sustentable.

Adicionalmente, más del 50% de la población consideran que no hay políticas o programas para el cuidado del medio ambiente, en especial para el manejo de residuos inorgánicos y con ello evitar contaminación de ríos, del suelo y del mismo aire de la comunidad.

Cerca del 40% de la población afirma que hay un alto grado de contaminación del medio ambiente originado por el cultivo del blueberry, ya que se requiere mayor mantenimiento de las huertas para mantener un alto rendimiento y una cosecha de calidad, por lo que ha aumentado las actividades agrícolas, el uso de combustibles, mayor cantidad y variedad de insumos, mayor capacidad de almacenamiento por lo que se han construido naves con sistemas de refrigeración, es decir, se necesita mayor cantidad de energía y se genera mayor cantidad de contaminantes en la atmósfera.



Gráfica 6. Impacto del medio ambiente actualmente

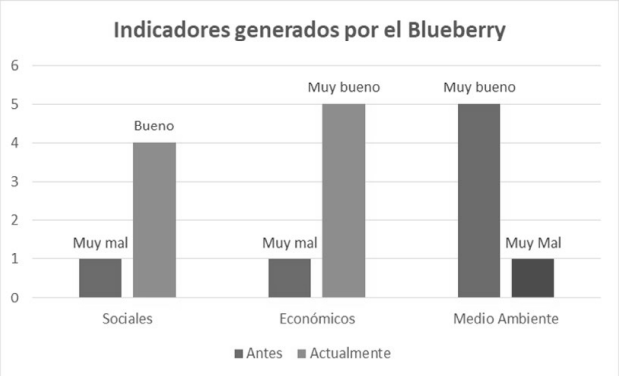
4. CONCLUSIONES

Los alimentos que más se producen en México recientemente son los berries, que incluyen a: la fresa, la zarzamora, el blueberry, la frambuesa, entre otros (Asociación Mexicana de Horticultura Protegida [AMHPAC], 2015). La comunidad de Xoxonacatla tiene las condiciones edafoclimaticas para la producción de blueberry de buena calidad y altos rendimientos, y ha originado beneficios a favor de la población.

Al igual que la producción nacional (SAGARPA, 2014), el 90% del blueberry se exporta en Xoxonacatla, trayendo como beneficio el incremento considerable de la economía de las familias de los productores, así como al resto de la comunidad y ha impactado favorablemente a comunidades de alrededor como el caso del estado de Jalisco (AMHPAC, 2015).

El blueberry ofrece beneficios alimentarios en una población (Ezzahra et al., 2018), y en el caso de Xoxonacatla se ha sostenido en la cadena global de valor del cultivo (Hernández et al., 2021), considerándose un cultivo rentable en los aspectos económicos (Alarcón, 2021).

El blueberry trae como beneficio una mejor economía en una comunidad rural, que permite mayor acceso a diferentes servicios de educación, la salud, la vivienda, la comercialización de bienes raíces, mayor acceso a las telecomunicaciones e internet, y desde luego a una mejor alimentación en las familias (Gráfica 7).



Gráfica 7. Indicadores del blueberry.

Este problema es derivado del crecimiento expansivo del cultivo de blueberry a nivel nacional, "las berries se posicionaron como el segundo producto agrícola de mayor valor en las exportaciones nacionales, con 4,700 millones de dólares, y una generación de más de 450 mil empleos" (SADER citado por Alcántara & Bushbeck, 2023).
Finalmente se requiere crear estrategias comunitarias participativas para el manejo de residuos orgánicos e inorgánicos y su reciclado; establecer políticas ambientales para el cuidado del agua, flora y fauna silvestre en la comunidad y; buscar la inclusión e intercalado de cultivos con el blueberry para minimizar un posible impacto negativo a la biodiversidad y ser un modelo de desarrollo regional.

Es recomendable diseñar un plan de trabajo en colaboración con la comunidad para implementar estrategias sobre el manejo de residuos, creación de corredores de polinizadores, establecer lineamientos de uso de suelo así como fortalecer un acompañamiento técnico, entre otras.

Las estrategias a generar deben estar enfocadas a toda la cadena de valor del blueberry, desde la producción, la comercialización y distribución del producto. En este caso de estudio, se observa una agricultura sustentable, sin embargo se necesita analizar las actividades y prácticas sostenibles en la comercialización y distribución del fruto, debido a las características a cumplir para su exportación (Hernández et al. 2021).

Dentro de los principales retos de los productores y productoras de blueberry, es mantener buenos rendimientos del cultivo, bajo las condiciones agroecológicas que se exigen actualmente para la certificación orgánica de las huertas y ser exportadores.

Y esto debe considerar minimizar el impacto negativo del medio ambiente, así como combatir problemas de plagas y enfermedades que ha surgido recientemente como la mosca de la fruta (*Drosophila suzukii*), pero de manera integral.

REFERENCIAS

Alarcón Rojas, J. J. (2021). Análisis comparativo de la rentabilidad de la producción arroz con la producción de arándano en el departamento de Lambayeque.

Alcántara, N. E. O. & Bushbeck, J. C. O. (2023). El sabor de la demanda de las 'berries'y los costos socioambientales de los agronegocios.

Alloatti, M. N. (2014). Una discusión sobre la técnica de bola de nieve a partir de la experiencia de investigación en migraciones internacionales. In IV Encuentro Latinoamericano de Metodología de las Ciencias Sociales (Costa Rica, 27 al 29 de agosto de 2014).

Asociación Mexicana de Horticultura Protegida [AMHPAC]. (2015). Jalisco exporta más del 90% de su producción de "berries". Notimex. Disponible en http://www.amhpac.org/es/index.php/noticias/547-jaliscoexporta-mas-del-90-de-su-produccion-de-berries

Ezzahra Housni, F., Lares-Michel, M., Aguilera-Cervantes, V. G., Guízar Mateos, I., Bracamontes Del Toro, H., &

Michel Nava, R. M. (2018). Impacto de la producción de berries sobre el comportamiento alimentario en una población de Jalisco, México. Revista mexicana de trastornos alimentarios, 9(1), 11-23.

Hernández Beltrán, A., Pérez Zamorano, A., Campos Rojas, E., & Torres Quintana, E. D. (2021). Sostenibilidad en la cadena global de valor del arándano entre México y China. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 12(5), 929-935.

Horn Robert V. (1993). Statistical indicators for the economic and social sciences. Cambridge, University Press, Hong Kong.

López, M. T., & Gentile, N. (2008). Sistema de indicadores económicos y sociales: la importancia del análisis integrado. In IX Encuentro Nacional de la Red de Economías Regionales en el Marco del Plan Fénix y II Jornadas Nacionales de Investigadores de las Economías Regionales.

Sampieri, R. H., Collado, C. F., Lucio, P. B., & Pérez, M. D. L. L. C (2014). Metodología de la investigación. McGraw-Hill.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2014). Para 12 o 13 de noviembre firma con China para exportar "berries", pronto equipo de AQSIQ aquí y seguirán a cerdo y tequila. Disponibl]e en http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/jalisco/boletines/2014/octubre/Documents/2014B10013.PDF.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Evaluation of the antifungal effect of a zinc nanoparticle formulation (HMC) against *Fusarium solani* during germination and plant development of tomato (*Solanum lycopersicum* L.)

Dalia Elizabeth Miranda Castilleja[*], José Luis Rodríguez Chávez[*, **], Alejandro Morillo Quereigua[*], Rocío Crystabel López González[***]

[*]*Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n Las Campanas. CP. 76010. Querétaro, Querétaro, México* (dalia.miranda@uaq.mx)

[**]*Centro Universitario Ceickor. Carretera Bernal, Acceso a Ezequiel Montes Km 3, Los Benitos, CP 76299, Colón, Queretaro, Mexico* (jose.rodriguez@centrouniversitarioceickor.edu.mx)

[***]*Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, Carretera al Ingenio Plan de Ayala, Vista Hermosa, C.P. 79010, Ciudad Valles, San Luis Potosí, México* (rcl.gonzalez27@gmail.com)

Abstract: Tomato is one of the most important crops, however, the management of *Fusarium* wilt remains challenging for the agricultural sector. Currently, a sustainable alternative for the control of phytopathogens are nanoparticle formulations. The objective of this project was to evaluate a formulation of zinc nanoparticles called "HMC", for the control of *Fusarium* wilt in tomato seeds and plants. For this, seeds inoculated with *Fusarium solani* ($1x10^4$ spores·mL^{-1}) were germinated, and were treated with 5 mL·L^{-1} of: 1) HMC, 2) Previcur (propil N-[3-(dimethylamino)propyl]carbamate), 3) Ridomil (methyl N-(methoxyacetyl)-N-(2,6-xylyl)-D-alaninate) and 4) water, determining the percentage of germination and incidence of the fungus after 10 days. In addition, 20 seedlings per treatment of 15 cm height, inoculated with $1x10^5$ spores·mL^{-1}, were treated with: HMC 5 mL·L^{-1} in two (HMC1) and eight (HMCrep) applications. During crop development, electrical conductivity (EC), pH, and fungal abundance in the soil were measured. At the end of the cultivation cycle the number of fruits, plant damage and height, as well as fungal concentration in the soil, roots, and rhizosphere were determined. Seed treatment with HMC reduced the incidence of *Fusarium* by 50% without affecting the germination rate. Plant treatment with HMC did not affect soil EC or pH, nor plant height. Treatment with HMC1 promoted earlier fruiting, doubled the number of fruits per plant, reduced the number of diseased plants and symptom severity, and decreased the incidence of *Fusarium* by tenfold compared to the control.

Keywords: *Solanum lycopersicum* cv. Saladet, nanoparticles, zinc salts, Vascular wilt, plant elicitation, early productivity

1. INTRODUCCIÓN

El tomate o jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas más apreciadas a nivel mundial y México es un importante productor, teniéndolo como su segundo producto agroalimentario de exportación (SIAP, 2024). La calidad y productividad del cultivo de tomate pueden verse afectadas por diversas enfermedades fúngicas, dentro de las que destacan las causadas por hongos del género *Fusarium*, las cuales pueden causar pérdidas de hasta el 90 % de la producción (Mostafa et al., 2022; Ma, et al. 2023).

El género *Fusarium* incluye al menos 70 especies de hongos cosmopolitas, muchas de ellas fitopatógenas que afectan cultivos comerciales (Toghueo, 2020). En tomate, las más relevantes son *Fusarium oxysporum f.sp. radicis-lycopersici* (FORL) y *Fusarium solani*, causantes de la pudrición del cuello y la marchitez vascular. Estos hongos pueden persistir en el suelo como clamidosporas y, al infectar las raíces, colonizan el xilema y se diseminan por los tejidos, provocando amarilleamiento sistémico, marchitez y, finalmente, la muerte de la planta (Srinivas et al., 2019).

Para controlar las enfermedades fúngicas existe el control químico, al que, no obstante, se le asocia con daños al medio ambiente, a la salud de las personas, a la diversidad ecológica, entre otras. Por ello, se considera prioritario el desarrollo y la

implementación de alternativas, dentro de las que destacan las basadas en nanotecnología (Gupta, Gupta and Tripathi, 2025).

La nanotecnología ha demostrado ser una herramienta eficiente para el manejo de plagas y enfermedades en diversos cultivos (Derbalah et al., 2019). Además, se ha reportado que su uso puede inducir mecanismos de defensa en las plantas (Shang et al., 2019), así como mejorar la calidad y el rendimiento de los cultivos (Islam et al., 2024). Entre los productos nanotecnológicos, las nanopartículas (NP) han sido las de mayor aplicación, debido en parte a la eficiencia y simplicidad de su proceso de producción (Draviana et al., 2021; Ershov and Ershov, 2024).

Una de las ventajas del uso de NP en el manejo de enfermedades es que no generan resistencia en los patógenos, en parte debido a los mecanismos de acción involucrados, los cuales incluyen daño estructural a la pared celular, inhibición de la síntesis de ergosterol, así como la alteración de la expresión génica. También, se ha observado su interacción con estructuras reproductivas e hifas, además de la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), que desencadenan procesos de peroxidación lipídica y disfunción mitocondrial (Slavin and Bach, 2022; Wang et al., 2017). Entre las distintas NP, las de óxidos metálicos han mostrado una destacada actividad antifúngica, sobresaliendo las de ZnO, CuO, Fe_2O_3, Fe_3O_4, MgO y ZrO (Cruz-Luna et al., 2023).

Considerando lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue determinar la capacidad antifúngica de una formulación de nanopartículas de zinc (HMC) para el control de *Fusarium solani* en semillas y plantas de tomate.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Sitio y fecha de experimentación

Los experimentos se realizaron de marzo a agosto del 2023, en laboratorios e instalaciones de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ).

2.2 Material biológico

Se empleó la cepa 5.1A de *Fusarium solani*, previamente aislada (2022) a partir de una planta de tomate con síntomas de marchitez vascular y caracterizada por su capacidad de infectar y causar un cuadro sintomatológico en plantas de tomate (datos sin publicar). La cepa se encuentra resguardada en crioconservación (-20° C) en el cepario del Laboratorio de Fermentaciones y Fisiología de Frutas y Hortalizas (UAQ).

A partir de un cultivo del hongo en agar papa y dextrosa (APD), se tomó una porción de 0.2 cm^2 de tejido micelar, la cual se transfirió a una nueva placa con APD. La placa se incubo a 25°C por 10 días. Posterior a la incubación, se colocaron 10 mL de una solución de Tween 20 al 0.1 % sobre la superficie del cultivo. Mediante raspado se suspendieron las esporas en la solución, la cual fue filtrada de manera aséptica. La concentración de esporas se cuantificó en cámara de Neubauer, ajustando la concentración deseada mediante diluciones con solución estéril.

Se emplearon semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L. var Saladet) Hortaflor H798 (Rancho Los Molinos S.A, México). Las semillas se lavaron con agua estéril hasta eliminar la cobertura y se secaron asépticamente.

2.3 Antifúngicos evaluados

- Previcur Energy (propil N-[3-(dimethylamino)propyl]carbamate). Bayer (Leverkusen, Alemania)
- Ridomil Gold 480SL (methyl N-(methoxyacetyl)-N-(2,6-xylyl)-D-alaninate). Syngenta (Basilea, Suiza)
- La nanoformulación antifúngica (HMC), basada en NP de Zn. Proporcionada por Silver Tech de México S.A. de C.V. (Guanajuato, México).

2.4 Evaluación de la nanoformulación HMC durante la germinación de semillas de tomate

Para esta evaluación se utilizó un diseño experimental completamente al azar, empleando 10 semillas como unidad experimental y 10 repeticiones por tratamiento.

Las semillas de tomate fueron infectadas por inmersión durante un minuto en una suspensión de $1x10^4$ esporas·mL^{-1} de *F. solani*. Las semillas inoculadas se colocaron en cajas Petri con papel filtro Whatman estéril, humedecido con agua estéril. Se colocaron 10 semillas por caja, hasta un total de 100 por tratamiento. A cada semilla se le aplicaron 25 µL de solución antifúngica a concentración de 5 mL·L^{-1} evaluando cuatro tratamientos: 1) HMC, 2) Previcur Energy, 3) Ridomil Gold 480SL y 4) agua como control positivo. Las cajas Petri se incubaron durante 10 días a temperatura ambiente y en oscuridad, hasta la germinación de las semillas. Se determinó la longitud de la radícula en milímetros (mm), el porcentaje de germinación (semilla con radícula emergida) y la incidencia de infección, la cual consideró la presencia de micelio blanquecino-rosado en la radícula y/o pudrición de los tejidos de la plántula.

2.5 Evaluación durante el crecimiento de plantas de tomate

Se realizó bajo un diseño experimental completamente al azar, utilizando una planta como unidad experimental y 20 repeticiones por tratamiento.

Se colocaron 120 semillas de tomate para su germinación en una charola nueva de poliestireno expandido con 200 cavidades, utilizando como sustrato una mezcla de fibra de coco y vermiculita (80:20). Cuando las plántulas mostraron tres hojas verdaderas y alcanzaron 12 cm de altura fueron trasplantadas a macetas individuales de polipropileno de 1 L, utilizando una mezcla de fibra de coco y perlita como sustrato y se mantuvieron en adaptación durante siete días (Bar-Tal and Saha, 2019). Se destinaron 20 plantas por tratamiento, los cuales consistieron en: 1) HMC1 (5 mL·L^{-1}) aplicado al inocular y antes de la floración (un mes después de trasplante);

2) HMCrep (5 mL·L^{-1}) aplicado cada 2 semanas (8 ocasiones en total); 3) control negativo (C-) de planta inoculada sin antifúngico y 4) control positivo (C+) de planta sin inocular.

Transcurrido el periodo de adaptación, se inoculó cada maceta vertiendo en el sustrato 10 mL de la suspensión de *F. solani* a una concentración de 1 × 10^4 esporas·mL^{-1}. Una hora después de la inoculación, se aplicó el primer tratamiento mediante riego. Cada planta recibió 150 mL de agua o solución HMC, según la frecuencia establecida por tratamiento. El riego común se aplicó cada dos días, manteniendo la humedad del sustrato en 90 %, la cual fue verificada con un tensiómetro de 30 cm (Irrometer Company, Inc., California, USA).

Cada dos semanas se realizaron muestreos, cinco en total (T0 a T4), para monitorear el pH con un potenciómetro de suelo Hanna Groline con electrodo HI1271, la conductividad eléctrica (CE) (µS/cm), mediante un conductímetro SoilTest HI98331 (Hanna Instruments, Inc., Woonsocket, Rhode Island) y la concentración de hongos en el sustrato (cultivo en APD). En cada muestreo también se midió la altura de las plantas. Y en el último muestreo se determinó la concentración de hongos en sustrato, rizosfera y raíz, así como el número de frutos por planta y el número de plantas con daño asociado a marchitez vascular (más de tres síntomas), incluyendo epinastia, marchitamiento, hojas amarillentas, marrones o marchitas, estrangulamiento del tallo o pecíolo.

Todas las determinaciones microbiológicas se realizaron tomando de manera aséptica, una porción de sustrato, raíz o rizosfera con una bolsa plástica estéril. Una vez en el laboratorio, bajo condiciones asépticas, de cada muestra se tomaron 10 g que se suspendieron en 90 mL de diluyente de peptona (DP) (0.1 % de peptona de caseína) y se homogeneizaron. Posteriormente, se efectuaron diluciones decimales seriadas (1 mL de suspensión + 9 mL de DP). De cada dilución se sembraron 100 µL mediante extensión en superficie en placas con APD adicionado con rifampicina (100 mg·L^{-1}). Las placas se incubaron a 25 °C durante 5 días y tras este periodo, se contabilizaron todos los hongos visibles y las colonias presuntivas (micelio blanquecino-rosado).

Todos los datos obtenidos se analizaron mediante análisis de varianza (ANDEVA) y prueba de comparación de medias de Tukey, utilizando el paquete estadístico JMP versión 14 (SAS Institute, North Carolina, USA).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Inhibición de Fusarium solani durante germinación

Los tratamientos de semillas de tomate con Previcur (PVC) y Ridomil (RDM), además de inhibir la infección por *F. solani*, afectaron negativamente el proceso de germinación. En el tratamiento con Ridomil (RDM) se observó un residuo blanquecino en la superficie del papel filtro, alrededor de las semillas que no debe confundirse con desarrollo microbiano (Figura 1).

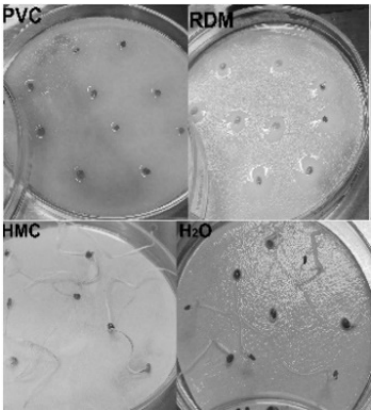


Figura 1. Semillas inoculadas con *Fusarium* spp. después de 10 días de germinación con los tratamientos (5 mL·L^{-1}) de: Previcur (PVC), Ridomil (RDM), HMC y agua (H_2O) como control.

Es importante considerar que el uso de fungicidas, en combinación con ciertos sustratos, puede afectar el desarrollo de plántulas (Bal et al., 2005). Diversos antifúngicos están formulados para su aplicación en el suelo o sustrato de cultivo, ya que el contacto directo con semillas o plántulas puede potenciar efectos fitotóxicos (Raid and Sui, 2012). Además, se ha reportado toxicidad de Ridomil hacia organismos no blanco. Por ejemplo, Guç et al. (2019) reportaron que este antifúngico provocó daños anatómicos en células meristemáticas de la raíz de cebolla (*Allium cepa*), así como alteraciones y fluctuaciones en la actividad enzimática de superóxido dismutasa y catalasa. Estos hallazgos respaldan la inhibición de la germinación observada en este estudio.

Por el contrario, los tratamientos con HMC y con agua (H_2O) permitieron la germinación de las semillas; sin embargo, se observó una incidencia de daño por el hongo de entre 44 y 77 % respectivamente. Esto demuestra una ventaja por parte de HMC sobre los compuestos comerciales, ya que puede ser empleado de manera directa sobre semillas para el control de *Fusarium* spp. en condiciones de pre-cultivo.

Por su parte, los tratamientos H_2O y HMC (5 mL·L^{-1}) no mostraron diferencias significativas en la longitud de la radícula; sin embargo, sí se observaron diferencias en las otras dos variables evaluadas (Cuadro 1). En cuanto a la incidencia fúngica, el control (H_2O) presentó valores porcentuales significativamente superiores, con una diferencia aproximada del 43 % respecto al tratamiento con HMC. En contraste, el porcentaje de germinación fue 12.8 % mayor en el tratamiento con HMC en comparación con el control.

A diferencia de los antifúngicos comerciales, HMC no solo no presentó síntomas de fitotoxicidad, sino que además demostró una ligera, pero significativa superioridad en comparación con el agua, tanto en el porcentaje de germinación como en la reducción de la incidencia fúngica, lo que respalda su potencial uso agrícola.

Cuadro 1. Germinación, incidencia y longitud de radícula después de 10 días de germinación de semillas de tomate infectadas con *Fusarium solani* y tratadas con agua (control) y HMC 5 ml·L^{-1}.

Tratamiento	Germinación (%)	Incidencia de *Fusarium* (%)	Longitud de radícula (mm)
DMSH*	9.682	16.09	4.34
H_2O	81.4 ± 11.7 ^{b}	70.0 ± 18.4 ^{a}	25.9 ± 3.9 ^{a}
HMC (5 mL·L^{-1})	93.3 ± 8.61 ^{a}	44.0 ± 15.8 ^{b}	27.8 ± 5.2 ^{a}

*DMSH: Diferencia mínima significativa.
Los datos se reportan como media ± desviación estándar.
Diferentes letras indican diferencia estadística entre tratamientos (Tukey α<0.05).

En estudios como el de García et al. (2015), tampoco se observaron efectos fitotóxicos asociados a NP de ZnO. Otras formulaciones basadas en NP de sales metálicas, como cobre, plata o zirconio, han mostrado efecto elicitor en cultivos como haba (*Vicia faba*) (Elsharkawy and Derbalah, 2018) y otras especies agrícolas (Kanhed et al., 2014). Este efecto inducido por NP podría explicar, al menos en parte, el mecanismo de protección observado frente a diversos fitopatógenos (Derbalah et al., 2019; Elmer et al., 2016; Lamsal et al., 2011).

3.2 HMC vs. Fusarium solani durante el cultivo de tomate

Durante el monitoreo de diversas variables en un cultivo de tomate infectado con *F. solani* y tratado con diferentes frecuencias de aplicación de HMC, se observó que la altura de las plantas aumentó progresivamente, siguiendo un patrón sigmoide simple de crecimiento (Figura 2), tal como lo describe Fang et al. (2022). Sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la altura entre los tratamientos con dos o más aplicaciones de HMC.

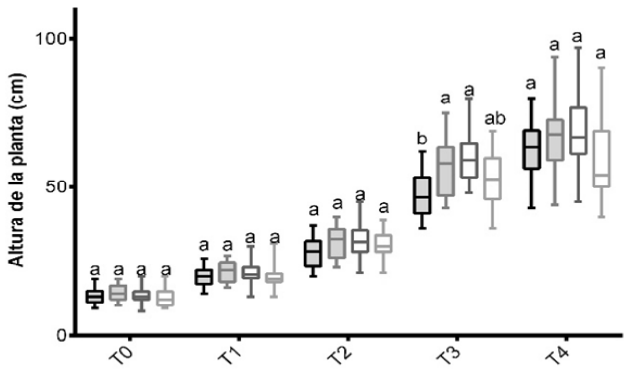


Figura 2. Altura de las plantas (cm) a lo largo del tiempo (T). En cada bloque T, se muestran los tratamientos: Control inoculado (C-) con contorno negro y relleno gris; control sin inocular (C+) con contorno y relleno gris; tratamiento de dos aplicaciones (HMC1) con contorno gris sin relleno; y tratamiento de ocho aplicaciones (HMCrep) con contorno gris claro sin relleno. Letras distintas en cada barra denotan diferencia significativa (Tukey α<0.05) entre los tratamientos de ese muestreo (T).

Durante el desarrollo del cultivo de tomate, el pH del suelo presentó fluctuaciones dentro de un rango de 7 a 8, con un ligero incremento entre los muestreos T1 y T2, seguido de una disminución entre T3 y T4 (Figura 3). En estos dos últimos muestreos, el tratamiento HMCrep mostró valores de pH similares al tratamiento inoculado sin antifúngicos (C-), mientras que el tratamiento con HMC1 (dos aplicaciones) presentó un comportamiento más cercano al control sin inocular (C+). Adicionalmente, se observó un incremento en la dispersión de los datos conforme avanzó el tiempo.

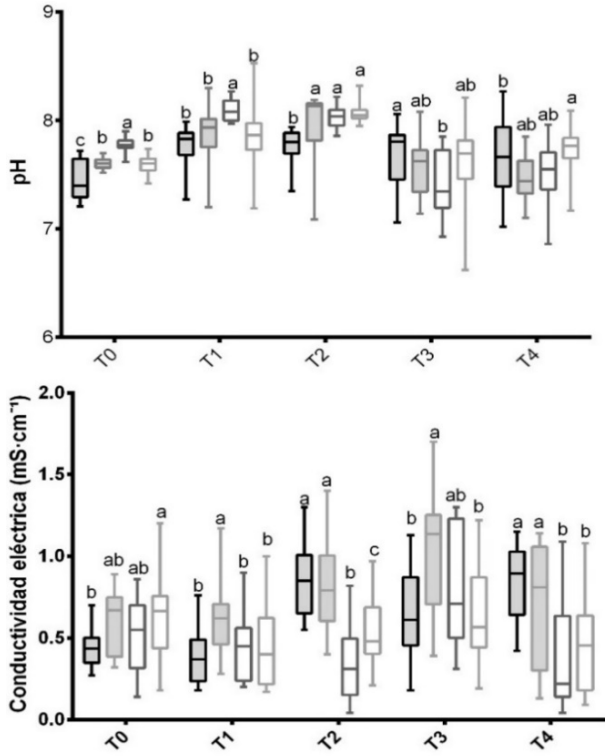


Figura 3. PH y conductividad eléctrica (CE), a lo largo del tiempo (T). En cada bloque T, se muestran los tratamientos, de izquierda a derecha: Control inoculado (C-) con contorno negro y relleno gris; control sin inocular (C+) con contorno y relleno gris; tratamiento de dos aplicaciones (HMC1) con contorno gris oscuro sin relleno; y tratamiento de ocho aplicaciones (HMCrep) con contorno gris claro sin relleno. Letras distintas en cada barra denotan diferencia significativa (Tukey α<0.05) entre tratamientos por muestreo (T).

En este estudio, los valores relativamente elevados de pH podrían atribuirse principalmente a las características del agua de riego, la cual, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2023), presenta un pH que varía entre 6.9 y 8.4 en el estado de Querétaro y no fue ajustado para este experimento. La presencia de iones como calcio, magnesio y fósforo puede contribuir a la liberación de carbonatos, lo que también tiende a elevar el pH. Por otra parte, durante el riego la saturación de las capas del sustrato modifica los patrones de flujo del agua, generando zonas con diferentes concentraciones iónicas que inciden en la variación del pH (Zheng et al., 2021).

En cuanto a la conductividad eléctrica (CE) del suelo, se observó una alta variabilidad de los valores en todos los muestreos (T), con promedios que oscilaron entre 0.3 y 1.3 $mS \cdot cm^{-1}$. Cada muestreo mostró diferencias significativas entre tratamientos; sin embargo, estas diferencias no fueron consistentes a lo largo del tiempo. En general, los valores de CE se mantuvieron por debajo de 1.5 $mS \cdot cm^{-1}$, umbral considerado adecuado para el cultivo de tomate, ya que permite una biodisponibilidad óptima de nutrientes (Dorais et al., 2001). El efecto de las nanopartículas (NP) sobre la CE del sustrato aún no está completamente esclarecido. Por un lado, se ha reportado que NP de óxidos metálicos como ZnO, CuO y CuO_2 pueden incrementar la CE del suelo hasta en 0.497 $mS \cdot cm^{-1}$ (Peng et al., 2017); y, por el contrario, también se ha observado que NP derivadas de sales de zinc, como ZnO y $ZnCl_2$, pueden reducirla (García-Gómez et al., 2015).

En el presente estudio, no se encontró una asociación clara entre las variaciones en la CE y la aplicación de NP. A lo largo del tiempo, el tratamiento C- mantuvo los valores más elevados de CE, mientras que los tratamientos con HMC presentaron valores relativamente bajos, especialmente en los muestreos T2 y T4. Diversos autores han señalado que la CE del suelo puede variar temporalmente en función del contenido de agua relacionándola directamente con los niveles de humedad del suelo (de Assis et al., 2022). Así pues, el flujo del agua a través del sustrato genera zonas con distintas concentraciones iónicas, lo que influye de manera directa en los valores de CE observados en el tiempo.

En relación con la concentración de hongos en el suelo (Figura 4), se observó una baja dispersión en la mayoría de los tratamientos, con excepción de algunos casos, como C- en el muestreo T2, y los tratamientos con HMC1 y HMCrep en T4.

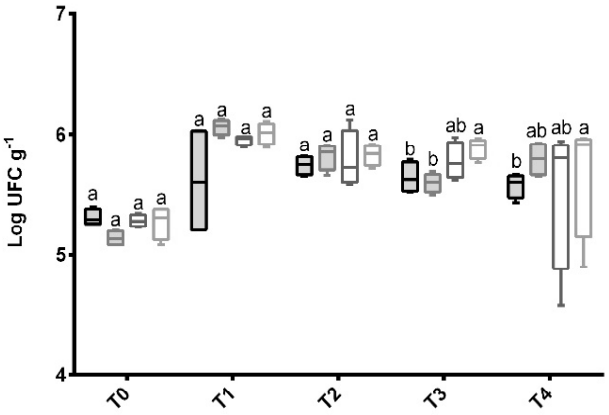


Figura 4. Concentración de hongos en suelo a lo largo del tiempo (T). En cada bloque T, se muestran los tratamientos: Control inoculado (C-) con contorno negro y relleno gris; control sin inocular (C+) con contorno y relleno gris; tratamiento de dos aplicaciones (HMC1) con contorno gris oscuro sin relleno; y tratamiento de ocho aplicaciones (HMCrep) con contorno gris claro sin relleno. Letras distintas en cada barra denotan diferencia significativa (Tukey $\alpha<0.05$) entre tratamientos por muestreo (T).

En el primer muestreo (T0), las concentraciones fúngicas se mantuvieron dentro de rangos considerados normales, entre 4 y 5 Log $UFC \cdot g^{-1}$, conforme a lo reportado por Haas et al. (2016). A partir de T1, se registró un incremento de aproximadamente 1 Log $UFC \cdot g^{-1}$ en todos los tratamientos. Este aumento podría atribuirse a las condiciones ambientales, particularmente una humedad relativa superior al 90 % y una temperatura promedio de 27 °C, las cuales han sido descritas como óptimas para la proliferación de hongos (Harrison et al., 1994; Castaño et al., 2018). Además, la fluctuación en la temperatura y la radiación solar, pueden influir significativamente en la diversidad y abundancia de especies fúngicas presentes en el suelo (Hernández et al., 2019).
En los muestreos T3 y T4 se observaron diferencias significativas entre tratamientos, siendo el inoculado sin antifúngicos (C-) el que presentó las concentraciones más bajas en ambos casos. Aunque este resultado podría parecer contrario a lo esperado, los datos corresponden a la concentración total de hongos y ésta no implica un efecto negativo sobre el desarrollo vegetal. Diversos autores han reportado que dentro de la comunidad fúngica del suelo existen especies que pueden promover el crecimiento y la salud de las plantas (Attia et al., 2022). Si bien en este estudio no se cuenta con evidencia adicional que permita atribuir a los tratamientos con HMC un efecto positivo sobre la proliferación de hongos benéficos, tampoco se identifican indicios de que las concentraciones observadas representen un riesgo para las plantas. En consecuencia, los niveles fúngicos detectados en los tratamientos con HMC no deben interpretarse, por sí solos, como desfavorables.

3.3 Evaluación final del daño causado por F. solani en las plantas de tomate

El último muestreo, de carácter destructivo, permitió cuantificar tanto la concentración total de hongos como la de aquellos presuntivamente *Fusarium* en tres compartimentos: suelo, rizósfera y raíz (Figura 5). Las concentraciones más elevadas de hongos se encontraron en el suelo, siendo el tratamiento C- el que presentó los valores más bajos en esta matriz. En contraste, en la raíz se observó un patrón inverso: el tratamiento C- mostró la mayor concentración de hongos, mientras que HMC1 (dos aplicaciones) presentó valores similares al control sin inocular (C+). Por su parte, HMCrep mostró una concentración intermedia, comparable tanto a C+ como a C-. Finalmente, las concentraciones fúngicas en la rizósfera se caracterizaron por presentar la menor dispersión entre tratamientos, lo que sugiere una mayor estabilidad en esta zona del sistema radical en comparación con suelo o raíz.

En el panel inferior de la figura 5, correspondiente a los presuntivos *Fusarium*, se observa mayor homogeneidad entre tipos de muestra y tratamientos. La concentración de presuntivos estuvo entre 2 y 3.5 Log $UFC \cdot g^{-1}$, lo que contrasta con la concentración fúngica total, que fue de los 3.5 a los 6.2 Log $UFC \cdot g^{-1}$.

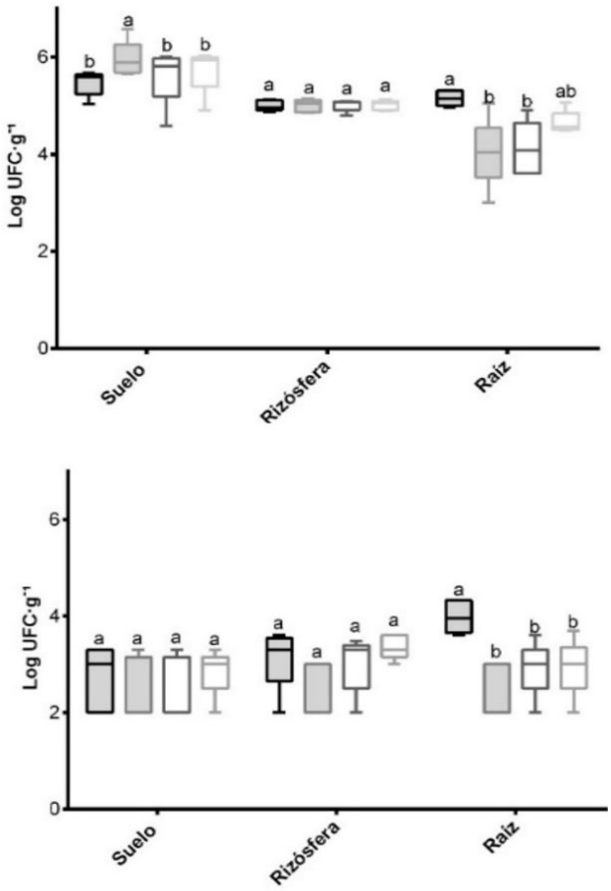


Figura 5. Concentración (Log UFC·g⁻¹) total de hongos (superior) y presuntivos *Fusarium* (inferior) en tres tipos de muestra al final del experimento. Para cada compartimento se muestran los tratamientos en las barras, de izquierda a derecha: Control inoculado (C-) con contorno negro y relleno gris; control sin inocular (C+) con contorno y relleno gris; tratamiento de dos aplicaciones (HMC1) con contorno gris oscuro sin relleno; y tratamiento de ocho aplicaciones (HMCrep) con contorno gris claro sin relleno. Letras distintas en cada barra denotan diferencia significativa (Tukey $\alpha<0.05$) entre tratamientos por tipo de muestra.

Las muestras de raíz de C– (inoculado sin antifúngico), presentaron la concentración fúngica más alta de todos los tratamientos. En contraste, este mismo presentó la menor concentración total de hongos en suelo. De hecho, en suelo aproximadamente 45 % de las colonias fúngicas correspondieron presuntivamente a *Fusarium*, mientras que en raíz esta proporción aumentó a casi 72 %. Esta diferencia puede explicarse por el comportamiento del patógeno: *Fusarium* tiende a permanecer en estado latente cuando se encuentra en el sustrato sin interacción directa con la raíz, y la dosis utilizada en este estudio fue relativamente baja (aproximadamente 100 esporas·cm⁻³). En cambio, al infectar tejido radicular, el hongo se activa y se multiplica dentro del sistema vascular de la planta, lo que justifica las mayores concentraciones observadas en raíz en plantas infectadas.

Estos resultados sugieren que la cuantificación de *Fusarium* en suelo o sustrato no es un método diagnóstico fiable para la detección de la enfermedad, ya que no refleja necesariamente la dinámica real de la infección en la planta. Es coherente, por tanto, que el tratamiento C– presentara la concentración más alta de estructuras compatibles con *Fusarium* en raíz, y que C+ (sin inoculación) presentara la más baja. Por su parte, ambos tratamientos con HMC mostraron concentraciones similares a C+. Este efecto podría estar relacionado con la actividad antimicrobiana de las NP, que dañan las membranas celulares, alteran procesos vitales como la respiración y la síntesis de ATP, y afectan la replicación del ADN (Cuervo-Osorio, Salazar and Ossa-Orozco, 2024).

Adicionalmente, se evaluó el número de plantas con más de tres síntomas visibles de enfermedad y el número de frutos por tratamiento (Figura 6).

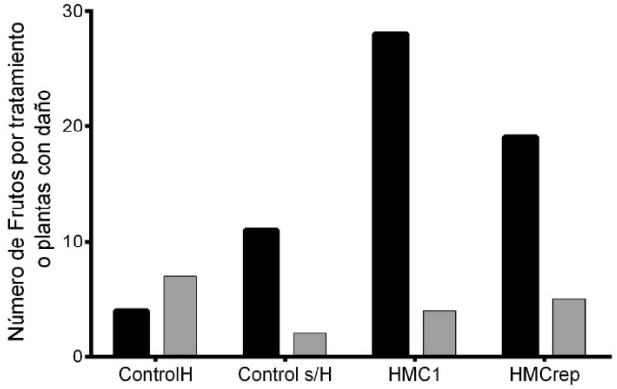


Figura 6. Número de frutos (barra negra) y plantas con más de tres síntomas de daño (barra gris) en cada tratamiento. Datos expresados como conteo total.

El tratamiento HMC1 (con dos aplicaciones) produjo el mayor número de frutos (29), en comparación con C+ (11 frutos), representando un aumento del 60.7 %. Este comportamiento sugiere que la nanoformulación podría estar actuando como un agente elicitor, promoviendo una fructificación temprana y más abundante. Dichos mecanismos de elicitación podrían también estar relacionados con una menor incidencia de plantas enfermas, debido a la activación de respuestas de defensa por parte del sistema inmune vegetal. Esto es consistente con lo reportado en otros estudios, donde se ha observado que ciertas NP pueden activar defensas en las plantas al estimular genes relacionados con el estrés, mejorar la absorción de nutrientes y aumentar la producción de antioxidantes, fortaleciendo así su resistencia a factores bióticos y abióticos (Akhter et al., 2025; Francis et al., 2024).

En este estudio, el uso de HMC resultó en un incremento significativo de la productividad en ambos esquemas de aplicación: un aumento del 154.5 % en la producción de frutos para el tratamiento HMC1 (dos aplicaciones), y del 72.7 % para HMCrep (ocho aplicaciones), en comparación con el control C+.

4. CONCLUSIONES

La nanoformulación HMC demostró una efectividad notable como agente antifúngico frente a *Fusarium solani* en el cultivo de tomate. Además de ofrecer protección contra la infección radicular, promovió la germinación y el desarrollo de la radícula en semillas. A lo largo del ciclo de cultivo, no se observaron alteraciones negativas en las propiedades fisicoquímicas del sustrato. El tratamiento con dos aplicaciones (HMC1) resultó ser el más eficiente, al favorecer la salud fisiológica de las plantas, reducir la presencia del patógeno en la raíz y disminuir el número de plantas enfermas, al mismo tiempo que incrementó significativamente la productividad y la precocidad del cultivo.

Sin embargo, los tratamientos con aplicaciones más frecuentes o en mayores concentraciones (como HMCrep) podrían afectar la fisiología vegetal. Por lo tanto, se recomienda realizar estudios adicionales que permitan dilucidar los mecanismos fisiológicos y moleculares involucrados, así como optimizar las condiciones de uso de la nanoformulación en este y otros cultivos de interés agrícola.

5. REFERENCIAS

Akhter, T., Rather, R. A., Mishra, N. S., and John, R. (2025). Nanoparticles in plant systems: Omics-based perspectives on stress adaptation and toxicological implications. Plant Nano Biology, 100181. https://doi.org/10.1016/j.plana.2025.100181

Attia, M.S., Abdelaziz, A.M., Al-Askar, A.A., Arishi, A.A., Abdelhakim, A.M.and Hashem, A.H. (2022). Plant Growth-Promoting Fungi as Biocontrol Tool against Fusarium Wilt Disease of Tomato Plant. Journal of Fungi. 8: 775. https://doi.org/10.3390/jof8080775

Bal, U., Altintas, S., Varis, S., and Kirkim, Z. (2006). Anti-damping-off fungicides and seedling media affect the growth, development and yield of cos lettuce. Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science, 56(2), 150-154. https://doi.org/10.1080/0906471051003096

Bar-Tal, A., and Saha, U. K. (2019). Chapter 7-Inorganic and synthetic organic components of soilless culture and potting mixtures (M. Raviv, JH Lieth, and AB T.-SC (Second E. Bar-Tal. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00007-4

Castaño, C., Lindahl, B.D., Alday, J.G., Hagenbo, A., Martínez de Aragón, J., Parladé, J., Pera, J. and Bonet, J.A. (2018). Soil microclimate changes affect soil fungal communities in a Mediterranean pine forest. New Phytologist, 220: 1211-1221. https://doi.org/10.1111/nph.15205

CONAGUA (2024). Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Tampaón-Zona de Sierra, estado de Querétaro. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/queretaro/DR_2211.pdf

Cruz-Luna, A.R. Vásquez-López, A. Rojas-Chávez, H. Valdés-Madrigal, M.A., Cruz-Martínez, H. and Medina, D.I. (2023). Engineered metal oxide nanoparticles as fungicides for plant disease control. Plants, 12: 2461. https://doi.org/10.3390/plants12132461

Derbalah A., Elsharkawy M.M., Hamza A., El-Shaer A. (2019). Resistance induction in cucumber and direct antifungal activity of zirconium oxide nanoparticles against Rhizoctonia solani. Pesticide Biochemistry and Physiology, 157, 230-236. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2019.03.018

de Assis, S.S., dos Santos, R. O., De Queiroz, D. M., de Souza Lima, J. S., Pajehú, L. F., and Medauar, C. C. (2022). Apparent soil electrical conductivity in the delineation of management zones for cocoa cultivation. Information Processing in Agriculture, 9(3), 443-455. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.04.004

Dorais, M., Papadopoulos A.P. and Gosselin, A. (2001). Influence of electrical conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. Agronomie, 21: 367–84. https://doi.org/10.1051/agro:2001130

Draviana, H.T., Fitriannisa, I., Khafid, M., Krisnawati, D.I., Widodo, Lai C.H., Fan, Y.J. and Kuo, T.R. (2023).Size and charge effects of metal nanoclusters on antibacterial mechanisms. J Nanobiotechnology, 15;21(1):428. https://doi.org/10.1186/s12951-023-02208-3

Elmer, W.H.and White, J.C. (2016). The use of metallic oxide nanoparticles to enhance growth of tomatoes and eggplants in disease infested soil or soilless medium. Environmental Science: Nano, 3: 1072–1079. https://doi.org/10.1039/C6EN00146G

Elsharkawy, M.M. and Derbalah, A. (2018). Antiviral activity of titanium dioxide nanostructures as a control strategy for Broad bean strain virus in faba bean. Pest Management Science, 75: 828-834. https://doi.org/10.1002/ps.5185.

Ershov, V. A., and Ershov, B. G. (2024). Effect of silver nanoparticle size on antibacterial activity. Toxics, 12(11), 801. https://doi.org/10.3390/toxics12110801

Fang, S. L., Kuo, Y. H., Kang, L., Chen, C. C., Hsieh, C. Y., Yao, M. H., and Kuo, B. J. (2022). Using sigmoid growth models to simulate greenhouse tomato growth and development. Horticulturae, 8(11), 1021. https://doi.org/10.3390/horticulturae8111021

Francis, D. V., Abdalla, A. K., Mahakham, W., Sarmah, A. K., and Ahmed, Z. F. (2024). Interaction of plants and metal nanoparticles: Exploring its molecular mechanisms for sustainable agriculture and crop

improvement. Environment International, 190, 108859. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108859

García-Gómez, C., Babin, M., Obrador, A., Álvarez, J.M., Fernández, M.D. (2015), Integrating ecotoxicity and chemical approaches to compare the effects of ZnO nanoparticles, ZnO bulk, and ZnCl2 on plants and microorganisms in a natural soil. Environmental Science and Pollution Research, 22: 16803–16813. https://doi.org/10.1007/s11356-015-4867-y

Guç, İ., Çavuşoğlu, K. and Yalçin, E. (2019). Toxicity induced by Ridomil in Allium cepa: physiological, cytogenetic, biochemical and anatomical approach. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 8(2): 85-97. ISSN: 2146-8168 http://dergipark.gov.tr/gbad

Gupta, C., Gupta, M.K. and Tripathi, S. (2025). Nanotechnology: a promising technology in sustainable agriculture. Discov Biotechnol, 2, 12. https://doi.org/10.1007/s44340-025-00022-1

Haas, D., Lesch, S., Buzina, W., Galler, H., Gutschi, A.M., Habib, J., Pfeifer, B., Luxner, J., and Reinthaler F.F. (2016). Culturable fungi in potting soils and compost. Medical Mycology, 54(8):825-34. https://doi.org/10.1093/mmy/myw047

Harrison, J.G., Lowe, R. and Williams, N.A. (1994). Humidity and fungal diseases of plants – problems. In Blakeman, J.P. and Williamson B. Ecology of plant pathogens. Wallingford: CAB International. pp. 79–97. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2626-3_2

Hernández, D.C., Vázquez, B.J.A., Vázquez, M.F., Berdeja, A.R., Morales, F.S.D., and Reyes, L.D. (2019). Abundancia y diversidad genética de Fusarium oxysporum y Trichoderma sp. en musa AAB. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 10(8), 1783-1796.

Islam, F., Imran, A., Afzaal, M., Zahoor, T., Amjad, N., Wei, C. R., Biswase, S., Fatimaf, M., Umair Arshada, M., Azmatg, F., Munawar, S. and Asif Shah, M. (2024). Nanotechnology for the improvement of the quality, properties, and safety of food and agriculture: recent and future trends. Cogent Food and Agriculture, 10(1), 2398857. https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2398857

Kanhed P., Birla S., Gaikwad S., Gade A., Seabra A.B., Rubilar O., Duran N. and Rai M. (2014). In vitro antifungal efficacy of copper nanoparticles against selected crop pathogenic fungi. Materials Letters, 115: 13–17. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.10.011

Lamsal, K., Kim, S.W., Jung, J.H., Kim, Y.S., Kim, K.S. and Lee, Y.S. (2011). Application of silver nanoparticles for the control of Colletotrichum species in vitro and pepper anthracnose disease in field. Mycobiology, 39: 194–199. https://doi.org/10.5941/MYCO.2011.39.3.194

Ma, M., Taylor, P. W. J., Chen, D., Vaghefi, N., and He, J.-Z. (2023). Major soilborne pathogens of field processing tomatoes and management strategies. Microorganisms, 11(2), 263. https://doi.org/10.3390/microorganisms11020263

Mostafa, Y. S., Alamri, S. A., Alrumman, S. A., Hashem, M., Taher, M. A., and Baka, Z. A. (2022). In Vitro and In Vivo Biocontrol of Tomato Fusarium Wilt by extracts from brown, red, and green macroalgae. Agriculture, 12(3), 345. https://doi.org/10.3390/agriculture12030345

Peng, C., Xu, C., Liu, Q., Sun, L., Luo, Y. and Shi, J. (2017). Fate and transformation of CuO nanoparticles in the soil-rice system during the life cycle of rice plants. Environmental Science and Technology, 51: 4907–4917. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05882

Raid, R. N., and Sui, D. D. (2012). Management of lettuce downy mildew with fungicides. Proceedings of the Florida State Horticultural Society, 125, 218-221.

Shang, Y., Hasan, M., Ahammed, G.J., Li, M. and Yin H. (2019). Applications of nanotechnology in plant growth and crop protection: a review. Molecules, 24(14): 2558. https://doi.org/10.3390/molecules24142558

Slavin, Y. N., and Bach, H. (2022). Mechanisms of antifungal properties of metal nanoparticles. Nanomaterials, 12(24), 4470. https://doi.org/10.3390/nano12244470

Srinivas, C., Devi, D. N., Murthy, K. N., Mohan, C. D., Lakshmeesha, T. R., Singh, B., and Srivastava, R. K. (2019). Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici causal agent of vascular wilt disease of tomato: Biology to diversity–A review. Saudi journal of Biological Sciences, 26(7), 1315-1324.

SIAP (2024). Escenario mensual de productos agroalimentarios. Dirección de Análisis Estratégico. Secretaría de Agricultura de y Desarrollo Rural. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/938464/Jitomate_Julio.pdf

Toghueo, R. M. K. (2020). Bioprospecting endophytic fungi from Fusarium genus as sources of bioactive metabolites. Mycology, 11(1), 1-21. https://doi.org/10.1080/21501203.2019.1645053

Wang, L., Hu, C. and Shao, L. (2017). The antimicrobial activity of nanoparticles: present situation and prospects for the future. International Journal of Nanomedicine, 14(12):1227-1249. https://doi.org/10.2147/IJN.S121956

Zheng, N., Guo, M., Yue, W., Teng, Y., Zhai, Y., Yang, J., and Zuo, R. (2021). Evaluating the impact of flood irrigation on spatial variabilities of soil salinity and groundwater quality in an arid irrigated region.

Hydrology Research, 52(1), 229-240. https://doi.org/10.2166/nh.2020.209

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

A Graphical User Interface in Octave for Pinch Point Analysis in Heat Exchanger Network Synthesis

López Villarreal, Francisco *, Pantoja Castro, Mayra Agustina **, Vázquez Castillo, José Antonio * , López Valdivieso, Leticia *

** Departamento de Química, Bioquímica y Ambiental, Tecnológico Nacional de México, Campus Villahermosa, Km. 3.5 Carretera, Villahermosa - Frontera, Cd Industrial, 86010, Centro, Tabasco, México (e-mail: jose.vc@villahermosa.tecnm.mx ; francisco.lv@villahermosa.tecnm.mx)*

***División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez Kilómetro 1, La Esmeralda, 86690, Cunduacán, Tabasco, México (e-mail: mayra.pantoja@ujat.mx)*

Abstract: This work presents the development of a graphical user interface (GUI) in GNU Octave for pinch point analysis applied to heat exchanger network (HEN) synthesis. Pinch analysis is a key methodology in chemical engineering for optimizing thermal energy use by identifying minimum utility requirements and maximizing internal heat recovery. While commercial simulators such as Aspen Plus or HYSYS are widely used, their high cost and black-box nature limit accessibility and transparency, particularly in educational contexts. The proposed GUI provides a free, open-source, and user-friendly alternative that enables step-by-step implementation of pinch point calculations and visualization of heat cascades. Its usefulness was demonstrated through four case studies commonly addressed in undergraduate curricula. The results obtained, pinch point temperatures for hot and cold streams, and minimum heating and cooling requirements, closely matched those reported in the literature, validating the tool's accuracy. Beyond accuracy, the GUI supports teaching and learning by fostering a deeper understanding of process integration and sustainable design.

Keywords: Pinch Analysis, Heat Exchange Networks, GNU Octave, Graphical User Interface, Process Integration.

1. INTRODUCTION

In the context of the global energy transition, process efficiency in industrial systems is a cornerstone for reducing environmental impact and operational costs. Pinch analysis, or the calculation of the pinch point, stands out as a critical tool in chemical engineering for optimizing thermal energy use in process systems. Originally developed by Linnhoff and Hindsmarsch, 1983, this methodology identifies the point of minimum temperature difference in composite curves of hot and cold streams, establishing theoretical limits for heat recovery and minimizing the consumption of external utilities such as steam or refrigerants. In industrial processes, where 20–50% of energy consumption is dedicated to heating and cooling, pinch analysis enables significant savings, with studies reporting reductions of up to 30% in energy demands through thermal integration (Kim et al., 2022; Linnhoff and Hindsmarsch, 1983)

The synthesis of heat exchanger networks (HEN) directly benefits from this technique, as it guides the design of optimal configurations that maximize internal heat transfer while avoiding thermodynamically inefficient crossings. Recent graphical and algorithmic methods based on pinch analysis enable not only the retrofitting of existing networks but also the incorporation of variable operational constraints, such as seasonal fluctuations in petrochemical or textile plants. This optimization is vital for sustainability, aligning with the United Nations' Sustainable Development Goals (SDG 7 and 9) by promoting CO_2 emission reductions equivalent to millions of tons annually in energy-intensive industries. For instance, integrations combining exergy and pinch analysis have shown improvements in the overall efficiency of waste heat recovery systems, fostering circular economies in sectors like green hydrogen production (Oliveira and Borges, 2024; Pavão et al., 2022; Sharew et al., 2024; Zhi et al., 2024).

From an educational perspective, teaching these techniques to undergraduate chemical engineering students is essential for developing key professional competencies, such as thermodynamic analysis, multivariable optimization, and systems thinking. In academic curricula, pinch analysis not only strengthens skills in process simulation and design but also fosters ethical awareness of efficiency and sustainability, preparing graduates for real-world challenges in Industry 4.0. Advanced pedagogical tools, such as interactive

visualizations, have proven effective in deepening understanding of HEN synthesis, enhancing conceptual retention and practical application in educational settings (How et al., 2023). Thus, integrating these concepts equips engineers with the skills to innovate in energy-responsible solutions.

This work presents a graphical user interface in Octave for accessible pinch point calculation, democratizing these tools in educational and research contexts with limited resources.

2. PROBLEM STATEMENT

The synthesis of heat exchanger networks (HEN) is a critical aspect of chemical process design, aimed at optimizing energy efficiency and reducing operational costs. Pinch point analysis is a well-established methodology for determining optimal heat transfer configurations in HEN, enabling the identification of minimum utility requirements and efficient heat recovery. However, proprietary software commonly used for pinch point analysis, such as Aspen Plus or HYSYS, often operates as a black-box, limiting transparency into the underlying algorithms and thermodynamic models. This lack of openness restricts users' ability to fully understand the computational processes and adapt methods to specific needs. Additionally, the high cost of commercial software poses a barrier for educational institutions and small-scale industries, hindering access to advanced process design tools.

Implementing pinch point analysis in open-source environments like GNU Octave offers a cost-effective, transparent alternative that fosters a deeper understanding of heat transfer principles and optimization techniques. However, a challenge in such environments is the lack of user-friendly interfaces, which can deter non-expert users from leveraging these tools effectively.

3. METHODOLOGY

The approach of this work involves the programming in the software GNU Octave (Eaton et al., 2024, version 9.3.0), the programming of the equations related with the pinch point method for the calculations of pinch point temperature and the minimum amount of heating and the minimum amount of cooling for the hot and cold streams under analysis. In the following subsections the detailed explanation of the approach is offered.

3.1 The equations of the pinch point method

The pinch point method is a fundamental tool in process integration, particularly in heat exchanger network design, as it identifies the minimum temperature difference between hot and cold streams and determines the maximum possible heat recovery in a process. The method ensures energy efficiency by minimizing the utility requirements.

1. Calculation of the heat capacity flowrate.

$$WCp_i = \dot{m}_i C_i \quad (1)$$

Where $\dot{m}_i$ is the mass flow rate of stream i and C_i is the heat capacity of stream i.

2. Adjustment of hot temperatures.

The adjustment of hot stream temperatures (Th_i) is carried out taking into account the specified minimum temperature difference.

$$Th_{ai} = Th_i - \frac{\Delta T_{min}}{2} \quad (2)$$

Where Th_{ai} are the adjusted hot stream temperatures .

3. For the adjusted temperatures intervals of temperature are created from higher to lower temperature and for each interval an enthalpy (ΔH) balance is performed.

$$\Delta H_i = (WCp_{hi} - WCp_{ci})(T_i - T_{i+1}) \quad (3)$$

where WCp_{hi} represents the heat capacity flowrate of hot streams, WCp_{ci} represents the heat capacity flowrate of cold streams.

4. Heat cascade: Assuming the non existence of external heat source, it is possible to evaluate the amount of heat that flows from the T_i level of temperature to T_{i+1} level.

$$Q_{i+1} = Q_i + \Delta H_i \quad (4)$$

Eq. 4 allow the determination of the minimum amount of external services of heating and cooling for the streams of the process.

3.2 Programming of the graphical user interface of the pinch point in GNU Octave

The development of the graphical interface in GNU Octave involves the following stages:

Stage 1: Writing the equations that define the pinch point method.

Stage 3: Programming of the graphical user interface to specify the simulation data and to display the results of the simulation.

4. CASE STUDIES

In this paper, four case studies are presented to demonstrate the usefulness of the developed graphical interface. These case studies correspond to common exercises found in bachelor's degree courses where heat exchange network synthesis is studied.

The first case study is taken from (Jimenez-Gutierrez, 2003). The data of the streams for this case study is presented in Table 1.

Table 1. Case study 1

Stream No.	Type	Supply temperature (F)	Target temperature (F)	Heat capacity flowrate ($BTUh^{-1}F^{-1}$)

1	Hot	250	100	9500
2	Hot	180	100	8400
3	Cold	110	200	10000
4	Cold	110	230	9000

The second case study is taken from (Smith, 2005). The data of the streams for this case study is presented in Table 2.

Table 2. Case study 2

Stream		Supply temperature (F)	Target temperature (F)	Heat capacity flowrate ($BTUh^{-1}F^{-1}$)
No.	Type			
1	Hot	752	140	568633.6865
2	Hot	410	104	947722.4405
3	Cold	68	320	758178.0635
4	Cold	212	572	1137266.818

The third case study is taken from (Smith, 2005). The data of the streams for this case study is presented in Table 3.

Table 3. Case study 3

Stream		Supply temperature (F)	Target temperature (F)	Heat capacity flowrate ($BTUh^{-1}F^{-1}$)
No.	Type			
1	Hot	1328	608	85294.803
2	Hot	968	428	75817.973
3	Cold	572	1652	81504.071
4	Cold	392	1022	37908.986

5. RESULTS

Three case studies were considered, all involving two cold streams and two hot streams. The graphical interface is not limited to this particular number of streams and in order to show this feature of the graphical tool, a fourth case study involving 6 hot streams and 4 cold streams was also approached. All cases were solved on a Dell Inspiron 15 with an AMD Ryzen 5 5500U processor (2.10 GHz) and 8 GB of RAM.

5.1 Case study 1

In order to illustrate the use of the graphical interface, the different stages of data specification in case study 1 are presented. The same procedure is applied to the other case studies. This case study involves two hot streams that must be cooled and two cold streams that must be heated. The objective is to determine the pinch point for each set of streams, as well as the corresponding heating and cooling requirements.

The four case study is taken from (Seider et al., 2016). The data of the streams for this case study is presented in Table 3.

Table 4. Case study 4

Stream		Supply temperature (F)	Target temperature (F)	Heat capacity flowrate ($BTUh^{-1}F^{-1}$)
No.	Type			
1	Hot	800	485	6903
2	Hot	485	326	6178
3	Hot	326	183	5108
4	Hot	183	172	44210
5	Hot	172	143	26830
6	Hot	143	65	9810
1	Cold	65	209	5171
2	Cold	209	210	1428200
3	Cold	210	435	4663
4	Cold	435	800	7245

Fig. 1 presents a screenshot of the graphical interface obtained after executing the program, which incorporates the interface code. The numbers of cold and hot streams are specified.

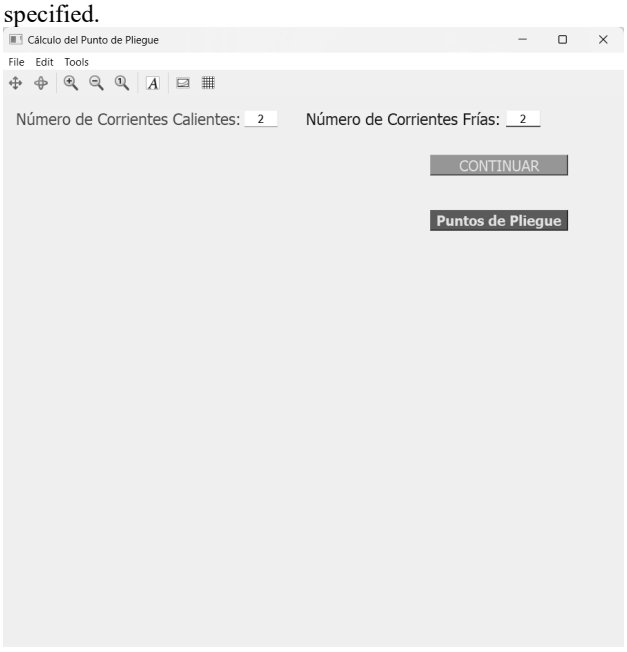


Figure 1. Specification of cold and hot streams in the graphical interface.

After specifying the number of streams, the "CONTINUAR" button is clicked, and the graphical interface shown in Fig. 2 is displayed. This interface enables the creation of fields for data entry according to the specified number of streams.

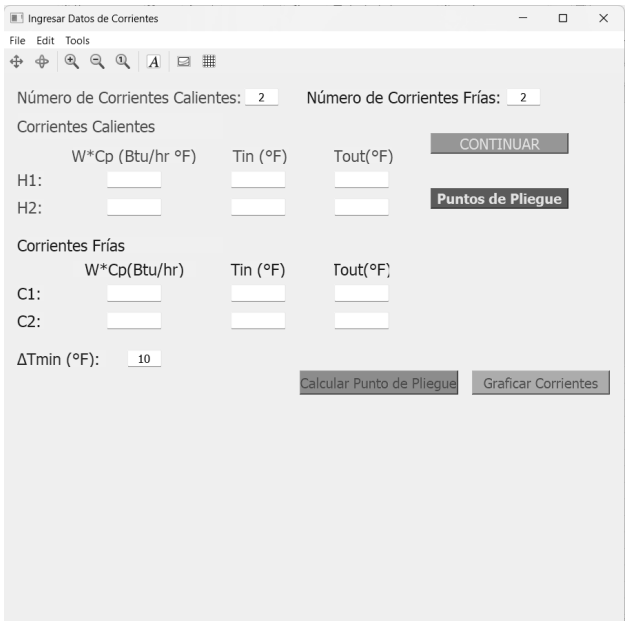


Figure 2. Blank spaces to be filled in the graphical interface

Fig. 3 presents a screenshot of the graphical interface after the specification of the temperatures and heat capacity flow rates for each stream.

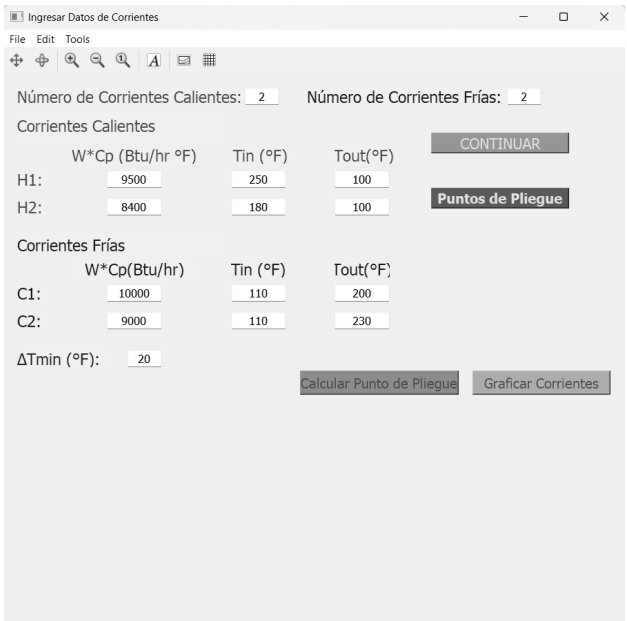


Figure 3. Specifications of case study 1

After specifying Case Study 1, the "Calcular Punto de Pliegue" button is clicked, initiating the calculations. Once the computations are completed, clicking the "Puntos de Pliegue" button displays the graphical interface shown in Fig. 4.

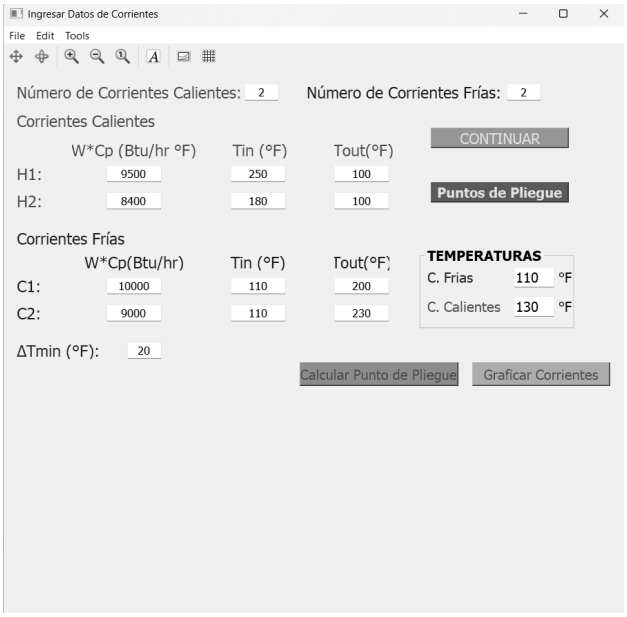


Figure 4. Calculations and results of the case study 1

By clicking the "Graficar Corrientes" button, it is possible to obtain the graphs of the heat cascades, both the original and the modified ones, as shown in Fig. 5.

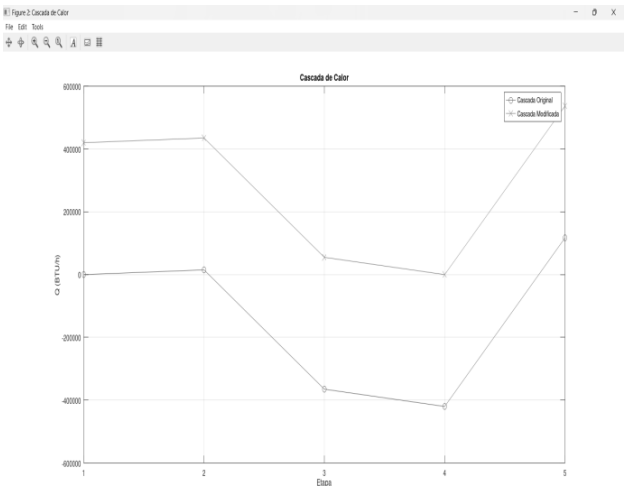


Figure 5. Heat cascade of case study 1

Clicking the "Graficar Corrientes" button also provides the representation of the hot and cold streams together with their

corresponding supply and target temperatures, as shown in Fig. 6.

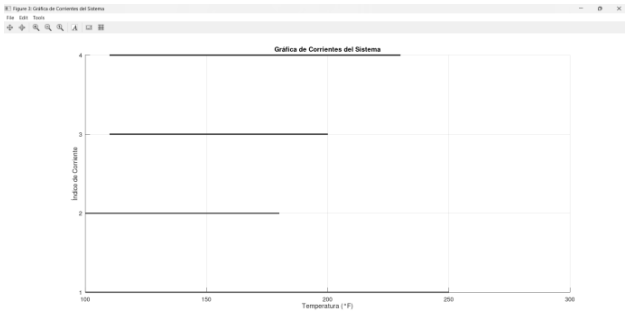


Figure 6. Representation of hot and cold streams and their supply and target temperatures of case study 1.

From Fig. 5 it is determined that the minimum amount of heating is $42x10^4$ BTU/h and the minimum amount of cooling is $53.7x10^4$ BTU/h. These values are obtained from the modified heat cascade and are obtained from the calculations of the method. These results are the same reported in the literature.

5.2 Case study 2

This case study involves two hot streams that must be cooled and two cold streams that must be heated. The objective is to determine the pinch point for each set of streams, as well as the corresponding heating and cooling requirements.

Fig. 7 presents a screenshot of the results obtained by using the graphical interface.

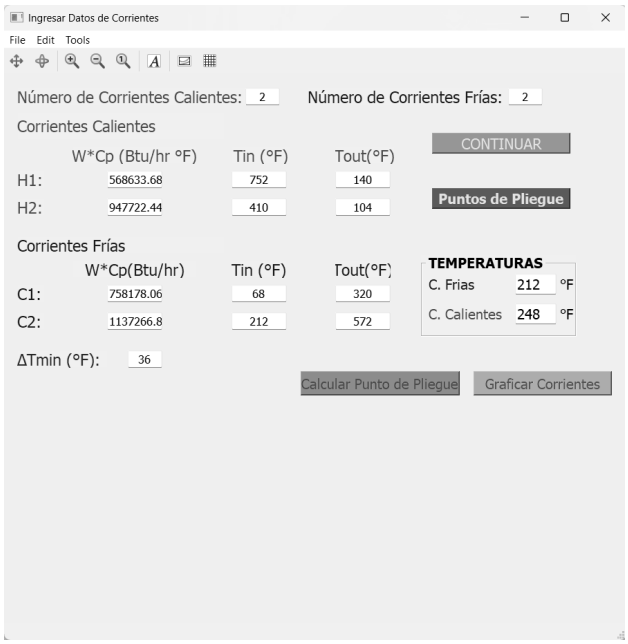


Figure 7. Calculations and results of case study 2

By clicking the "Graficar Corrientes" button, it is possible to obtain the graphs of the heat cascades of case study 2, both the original and the modified ones, as shown in Fig. 8.

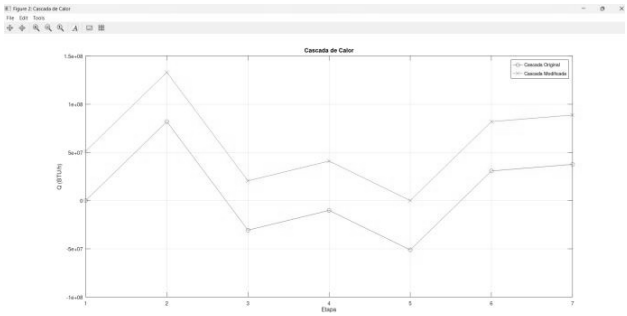


Figure 8. Heat cascade of case study 2

Fig. 9. provides the representation of the hot and cold streams together with their corresponding supply and target temperatures of case study 2.

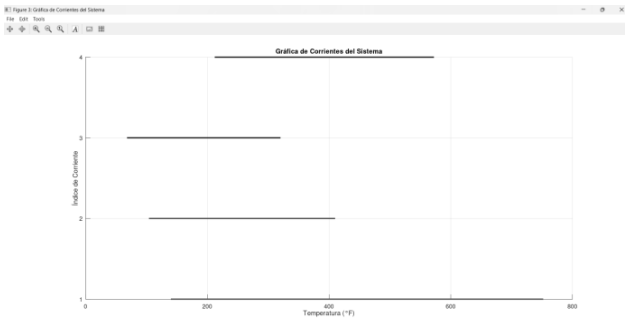


Figure 9. Representation of hot and cold streams and their supply and target temperatures of case study 2.

From Fig. 8 it was determined that the minimum amount of heating was $5.12x10^7$ BTU/h (14.9984 MW) , the reported value of the source of this case of study was 15 MW, and the minimum amount of cooling was $8.87x10^7$ BTU/h (25.9974 MW) , the reported value of the source of this case of study was 26 MW. These values are obtained from the modified heat cascade and are obtained from the calculations of the method.

5.3 Case study 3

This case study involves two hot streams that must be cooled and two cold streams that must be heated. The objective is to determine the pinch point for each set of streams, as well as the corresponding heating and cooling requirements.

Fig. 10 presents a screenshot of the results obtained by using the graphical interface.

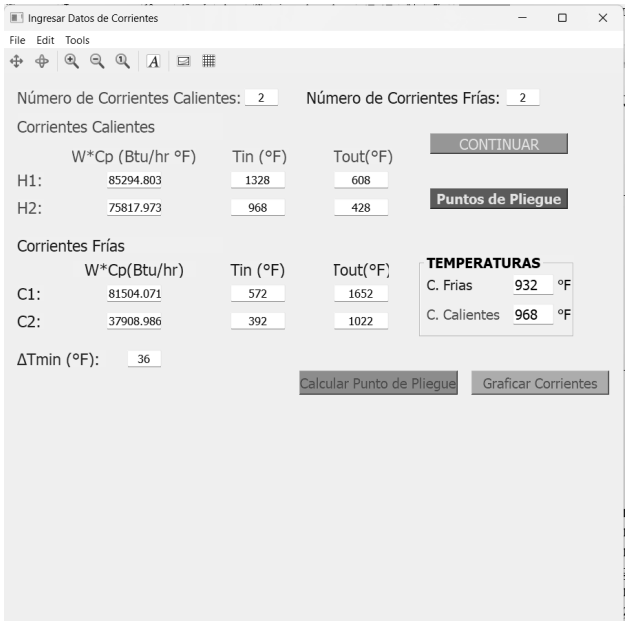


Figure 10. Calculations and results of case study 3

By clicking the "Graficar Corrientes" button, it is possible to obtain the graphs of the heat cascades of case study 3, both the original and the modified ones, as shown in Fig. 11.

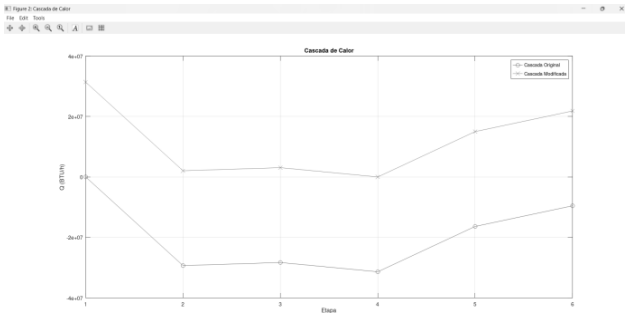


Figure 11. Heat cascade of case study 3

Fig. 12. provides the representation of the hot and cold streams together with their corresponding supply and target temperatures of case study 3.

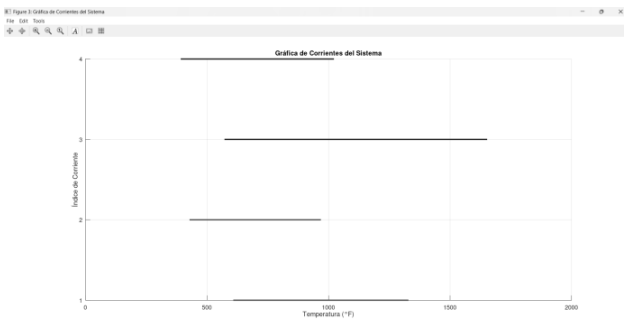


Figure 12. Representation of hot and cold streams and their supply and target temperatures of case study 3.

From Fig. 11 it was determined that the minimum amount of heating was $3.1389x10^7$ BTU/h (9.1992 MW) , the reported value of the source of this case of study was 9.2 MW, and the minimum amount of cooling was $2.1836x10^7$ BTU/h (6.3994 MW) , the reported value of the source of this case of study was 6.4 MW. These values are obtained from the modified heat cascade and are obtained from the calculations of the method.

5.4 Case study 4

This case study involves six hot streams that must be cooled and four cold streams that must be heated. The objective is to determine the pinch point for each set of streams, as well as the corresponding heating and cooling requirements.

Fig. 13 presents a screenshot of the results obtained by using the graphical interface.

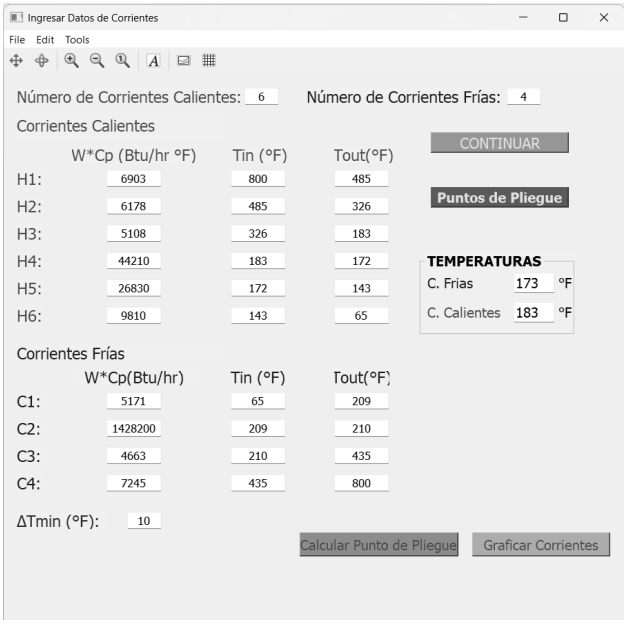


Figure 13. Calculations and results of case study 4

By clicking the "Graficar Corrientes" button, it is possible to obtain the graphs of the heat cascades of case study 4, both the original and the modified ones, as shown in Fig. 14.

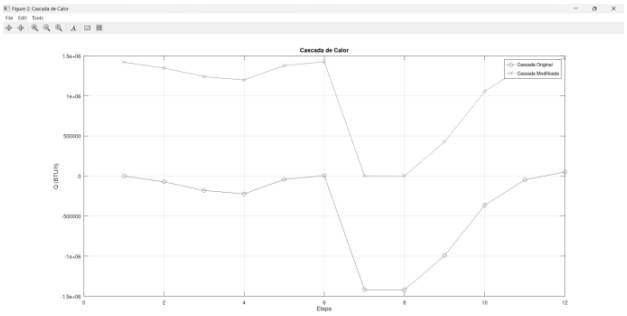


Figure 14. Heat cascade of case study 4

Fig. 15. provides the representation of the hot and cold streams together with their corresponding supply and target temperatures of case study 4.

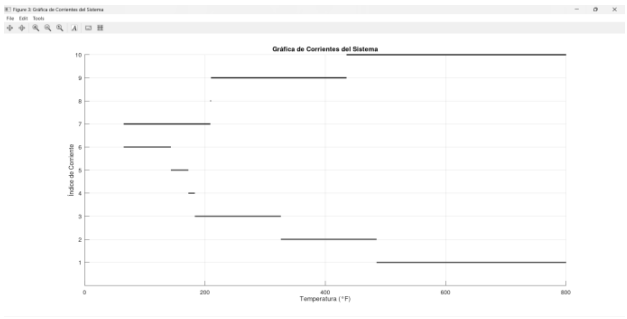


Figure 15. Representation of hot and cold streams and their supply and target temperatures of case study 4.

From Fig. 14 it was determined that the minimum amount of heating was 1.4208×10^6 BTU/h (0.4164 MW) , the reported value of the literature of this case of study was 1.421×10^6 BTU/h, and the minimum amount of cooling determined was 1.4711×10^6 BTU/h (0.4312 MW) , the reported value of the source of this case of study was 1.471×10^6 BTU/h. These values are obtained from the modified heat cascade and are obtained from the calculations of the method.

6. CONCLUSIONS

This work presented the development and application of a graphical user interface (GUI) in GNU Octave for the implementation of pinch point analysis in heat exchanger network synthesis. The GUI was evaluated through four case studies that correspond to typical problems addressed in undergraduate courses on process integration. The results obtained confirm both the reliability and the educational value of the tool.

In case study 1, the GUI yielded minimum heating and cooling requirements of 42×10^4 BTU/h and 53.7×10^4 BTU/h, respectively. These values were consistent with those reported in the literature, validating the accuracy of the method implemented. In case study 2, the minimum heating demand calculated was 5.12×10^7 BTU/h (14.9984 MW) compared to the reported 15 MW, and the minimum cooling demand was 8.87×10^7 BTU/h (25.9974 MW) compared to the reported 26 MW. The close agreement demonstrates the robustness of the approach. Similarly, in case study 3, the GUI obtained heating and cooling requirements of 9.1992 MW and 6.3994 MW, respectively, which coincide with the reported values of 9.2 MW and 6.4 MW. Whereas the results of case study 4 revealed a very close set of values among the minimum amount of heating and the minimum amount of cooling values for both the calculated and the reported in the literature.

Overall, the outcomes of the four case studies confirm that the developed GUI successfully reproduces established results from the literature, while providing an interactive platform that enhances the learning process. The tool not only facilitates the understanding of pinch analysis concepts but also supports students in visualizing the step-by-step procedure of data specification and heat cascade construction. Therefore, this GUI represents a valuable contribution to process engineering education by offering an accessible, free, and effective alternative to commercial simulation software.

7. REFERENCES

Linnhoff, B., and Hindmarsh, E. (1983). The pinch design method for heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*, 38(5), 745–763.

Kim, Y., Lim, J., Shim, J. Y., Hong, S., Lee, H., and Cho, H. (2022). Optimization of heat exchanger network via pinch analysis in heat pump-assisted textile industry wastewater heat recovery system. *Energies*, 15(9), 3090.

Zhi, K., Wang, B., Guo, L., Chen, Y., Li, W., Ocłoń, P., and Varbanov, P. S. (2024). Graphical pinch analysis-based method for heat exchanger networks retrofit of a residuum hydrogenation process. *Energy*, 299, 131538.

Pavão, L. V., Costa, C. B., and Ravagnani, M. A. (2022). Multiperiod heat exchanger network synthesis with pinch-based strategies and metaheuristics. *Frontiers in Sustainability*, 3, 888251.

Sharew, S. S., Di Pretoro, A., Yimam, A., Negny, S., and Montastruc, L. (2024). Combining exergy and pinch analysis for the operating mode optimization of a steam turbine cogeneration plant in Wonji-Shoa, Ethiopia. *Entropy*, 26(6), 453.

Oliveira, M., and Borges, A. D. (2024). Enhancing energy efficiency in integrated electrolyser stack and methanation reactor systems through pinch analysis. *Reactions*, 5(4), 984–998.

How, B. S., Teng, S. Y., Orosz, Á., Sunarso, J., and Friedler, F. (2023). Enabling in-depth analysis in heat exchanger network synthesis via graph-theoretic tool: Experiences in Swinburne University of Technology Sarawak Campus. *Education for Chemical Engineers*, 43, 100–112.

Gutiérrez, A. J. (2003). Diseño de procesos en ingeniería química. Reverté. Barcelona, España.

Smith, R. (2005). Chemical process: design and integration. John Wiley & Sons. London,England.

Seider, W. D., Lewin, D. R., Seader, J. D., Widagdo, S., Gani, R., and Ng, K. M. (2016). Product and process design principles: synthesis, analysis and evaluation. John Wiley & Sons. New York, USA.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Treatment of Mezcal Vinasses for the Removal of Phenolic Compounds Using Adsorption-Desorption Processes

Del Palacio-Salas Marcela*, De La Peña-Arellano Luis Armando*, Rodríguez-Rosales María Dolores Josefina*, Valle-Cervantes Sergio*, Montoya-García Tania*, Alcázar-Medina Félix Alonso**.

*TecNM/Instituto Tecnológico de Durango, Maestría en Sistemas Ambientales, UPIDET, Blvd. Felipe Pescador 1830 Ote. Col. Nueva Vizcaya, 4080, Durango, DGO México. *(e-mail: {17041219,aparellano}@itdurango.edu.mx)*

** Programa de Investigadoras e Investigadores por México SECIHTI, Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Avenida Insurgentes Sur 1582, Colonia Crédito Constructor, Alcaldía Benito Juárez 03940, Ciudad de México, México. (*e-mail: fmedina@itdurango.edu.mx*)

Abstract: The adsorption capacity of two commercial activated carbons—granular (CAGC) and powdered (CAPC)—was evaluated for the removal of phenolic compounds from mezcal vinasse. Both the vinasse and the adsorbents were characterized, and batch experiments were conducted varying pH, temperature, and adsorbent mass. Experimental data were fitted to adsorption isotherm and kinetic models. CAGC achieved a removal efficiency of 83.22 % at pH 3.7, 24 ± 2° C, and 6 g, fitting best to the Langmuir model, while CAPC reached 59.00 % at pH 3.7, 30 ± 1 °C, fitting best to the Freundlich model. The pseudo-second-order kinetic model adequately described the mechanism for both processes. This comparative evaluation of commercial activated carbons provides useful information for selecting adsorbents in the treatment of mezcal vinasse, concluding that CAGC exhibits greater efficiency for phenolic compound adsorption.

Keywords: activated carbon; adsorption; mezcal vinasse; phenolic compounds

1. INTRODUCCIÓN

La industria mezcalera constituye una de las actividades agroindustriales de mayor relevancia en México. Ha experimentado un crecimiento sostenido durante la última década, impulsado por la demanda nacional e internacional. No obstante, esto conlleva una problemática ambiental asociada a la generación de las vinazas mezcaleras, efluentes líquidos residuales que se producen en grandes volúmenes durante el proceso de destilación del mosto fermentado. Se estima que por cada litro de mezcal se generan entre 10 y 15 litros de vinaza, lo que se traduce en un volumen de descarga elevado con potencial impacto ambiental si no se implementa el tratamiento de ellas (Escudero Santiago et al., 2023).

Las vinazas presentan un pH ácido, elevada carga orgánica y Demanda Química de Oxígeno (DQO), presencia de sólidos suspendidos y disueltos, compuestos de naturaleza recalcitrante como las melanoidinas y compuestos fenólicos (CF) (Díaz et al., 2020). Los CF se distinguen por su toxicidad, persistencia y difícil biodegradabilidad, lo que dificulta su eliminación mediante técnicas convencionales. Estos compuestos y sus derivados contribuyen al color marrón y la acidez del efluente; adicionalmente, generan efectos tóxicos sobre organismos acuáticos, inhiben procesos biológicos y deterioran la calidad de cuerpos de agua receptores (Rodríguez, 2019). Diversos procesos se han aplicado para reducir su impacto, entre ellos la digestión anaerobia, coagulación-floculación, oxidación avanzada (ozono, UV/H_2O_2) y membranas. Aunque eficaces en algunos aspectos, estas tecnologías presentan limitaciones económicas y operativas. En este contexto, la adsorción ha demostrado ser una alternativa atractiva debido a su alta eficiencia y posibilidad de regeneración del adsorbente y disponibilidad de materiales adsorbentes, lo que permite la reducción de costos y recuperación de compuestos de valor. El carbón activado (CA) es uno de los materiales adsorbentes más utilizados debido a su elevada área superficial, estructura porosa y presencia de grupos funcionales que permiten las interacciones con compuestos aromáticos. La mayoría de estudios disponibles se han realizado en soluciones sintéticas o efluentes diferentes a las vinazas mezcaleras, lo que representa un problema en la aplicación directa del proceso de adsorción sobre este tipo de efluente, caracterizado por su alta complejidad química y variabilidad composicional (la cual depende del proceso de producción). Por lo que resulta indispensable evaluar la influencia de variables operativas importantes, como pH, concentración del adsorbente, temperatura y tiempo de contacto.

El presente estudio aborda la problemática variando condiciones de operación clave: pH (3.7, 7.0 y 10.0), dosis de adsorbente (1, 3 y 6 gramos), temperatura (24±2 y 30±1 °C). Las condiciones óptimas serán utilizadas a futuro en una configuración semicontinua para establecer los mejores parámetros de operación más cercanos a condiciones industriales.

2. VINAZA

Las vinazas provienen de los procesos de fermentación alcohólica y destilación de materias primas azucaradas (Fig.

1). Su composición es altamente variable y depende de factores como la fermentación empleada y la naturaleza de la materia prima (CONADESUCA, 2016).

La generación de vinaza no es exclusiva de la industria mezcalera, sino que se produce también en la destilación de bebidas alcohólicas como ron y tequila. Se pueden considerar un residuo líquido industrial, por lo que su descarga está sujeta al cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

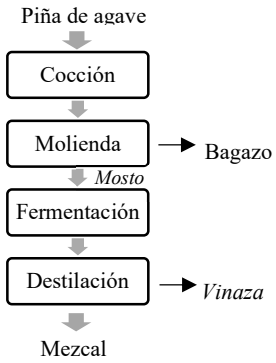


Figura 1. Proceso de producción del mezcal
Fuente: Elaboración propia

3. ADSORCIÓN

La adsorción es un proceso fisicoquímico en donde moléculas líquidas o gaseosas (adsorbato) se acumulan en la superficie de un sólido (adsorbente). Existen dos tipos de adsorción, la fisisorción y la quimisorción (Tubert & Talanquer, 1989).

La fisisorción implica fuerzas de van der Waals. Se consideran interacciones débiles entre el adsorbato y el adsorbente, en donde pueden formarse monocapas o multicapas en el adsorbente y el proceso es reversible. La quimisorción implica enlaces químicos por lo que generalmente se considera un proceso irreversible y supone que la adsorción se lleva en monocapa (Caputo, 2020).

Los factores más importantes que influyen en el proceso de adsorción son la naturaleza del adsorbato, pH del medio, temperatura y características del adsorbente como su área superficial y selectividad.

3.1 Cinética de adsorción

La diferencia entre la concentración inicial (C_0) y la concentración en un tiempo dado (C_t) corresponde a la fracción removida de la solución en un tiempo dado (q_t), lo que permite estimar la cantidad que se acumula en el adsorbente (Edet & Ifelebuegu, 2020). Esto se calcula usando (1).

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{m} \quad (1)$$

En donde las concentraciones son expresadas en mg/L; V es el volumen de la solución (L) y m es la masa del adsorbente (g).

4. MODELOS CINÉTICOS

Estos modelos permiten describir la rapidez en la que el adsorbato llega a la superficie del adsorbente y proporciona información sobre el proceso de adsorción.

4.1 Cinética de pseudo-primer orden

Supone que la velocidad de adsorción es proporcional a la diferencia entre la capacidad de equilibrio y la cantidad adsorbida en un tiempo t. La ecuación diferencial que describe este modelo se muestra en (2):

$$\frac{dq_t}{d_t} = k_1(q_e - q_t) \quad (2)$$

Al integrar (2) se obtiene la forma linealizada del modelo, expresada en (3):

$$ln(q_e - q_t) = ln(q_e) - k_1(t) \quad (3)$$

En donde k_1 es la constante de velocidad de adsorción (min^{-1}), q_e y q_t es la cantidad adsorbida en el equilibrio y la cantidad adsorbida en el tiempo t respectivamente (mg/g).

4.2 Cinética de pseudo-segundo orden

Es asociado a sistemas en donde la adsorción ocurre mediante interacciones químicas. La ecuación diferencial que describe este modelo se representa en (4):

$$\frac{dq_t}{d_t} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (4)$$

Al integrar (4) se obtiene la forma linealizada que se muestra en (5):

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \cdot q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

En donde k_2 es la constante de velocidad de adsorción ($\text{min}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{g}$).

4.3 Cinética de Elovich

Este modelo es utilizado para describir sistemas con gases, pero puede ser utilizado para describir cinéticas de adsorbatos líquidos. La ecuación diferencial que define este modelo se muestra en (6).

$$\frac{dq_t}{d_t} = \alpha e^{-\beta q_t} \quad (6)$$

Tras integrar (6) bajo las condiciones iniciales $q_t = 0$ en $t = 0$, se obtiene la forma linealizada expresada en (7):

$$q_t = \frac{1}{\beta}\ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta}\ln(t) \quad (7)$$

En donde α expresa la tasa de quimisorción y β es la cobertura de superficie.

5. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

5.1 Isoterma de Langmuir

Este isoterma supone que las moléculas adsorbidas no interactúan entre sí y que todos los sitios tienen la misma energía, es decir, que son homogéneos y supone que la adsorción es en monocapa (Jabbari & Ghasemi, 2024). Es expresada con (8):

$$q_e = \frac{q_{max} \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \quad (8)$$

En donde q_e y q_{max} son la cantidad de adsorbato adsobido en el equilibrio y la capacidad máxima de adsorción respectivamente (mg/g); K_L es la constante de adsorción de Langmuir (L/mg) y C_e es la concentración en el equilibrio del adsorbato (mg/L).

En el modelo de Langmuir se maneja un coeficiente de separación R_L (adimensional). El cual describe la afinidad del adsorbente por el adsorbato. *Si* $R_L>1$ es una adsorción desfavorable, *Si* $R_L=1$ es lineal, si $R_L=0$ es irreversible y $0 < R_L < 1$ es favorable, se calcula utilizando (9).

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L \cdot C_0} \quad (9)$$

En donde C_0 es la concentración inicial del adsorbente (mg/L).

5.2 Isoterma de Freundlich

La ecuación (10) correspondiente al modelo de Freundlich, describe superficies heterogéneas y supone que no hay un límite de adsorción máximo y que el proceso se lleva a cabo en multicapa.

$$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n} \quad (10)$$

En donde K_F es la constante de Freundlich que indica la capacidad de adsorción (L/mg) y $1/n$ es la intensidad de adsorción. Cuando $0 < 1/n < 1$ la adsorción es favorable, si $1/n > 1$ no es favorable y si $1/n = 1$ es irreversible.

5.3 Isoterma de Temkin

La ecuación (11) corresponde al isoterma de Temkin, modelo que supone que el calor de adsorción disminuye de forma lineal conforme aumenta la cantidad de soluto adsorbido.

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln(K_T C_e) \quad (11)$$

En donde R es la constante universal de los gases, b es un parámetro relacionado con el calor de adsorción (J/mol), y K_T es la constante de equilibrio de Temkin, la cual supone la afinidad del adsorbente hacia el adsorbato (L/g).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Vinaza

Se utilizó una vinaza proveniente del estado de Durango. Refrigeradas a 5 °C para su conservación y uso experimental.

6.1.1 Caracterización de la vinaza

Se caracterizaron los parámetros fisicoquímicos, mostrados en la Tabla 1, donde se indican el equipo utilizado y su método de referencia.

Tabla 1. Métodos y técnicas de referencias para la caracterización de las muestras de vinaza

Parámetro	Equipo/Método	Referencia
pH	Potenciómetro HANNA HI98100	NMX-AA-093-SCFI-2000
Color	Espectrofotómetro UV-Vis	NMX-AA-17-1980
DQO	Reactor DQO, Hanna Mod. HI839800	NMX-AA-030-SCFI-2001
Conductividad eléctrica (CE)	Conductímetro	NMX-AA-093-SCFI-2000
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Gravimetría	NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos Disueltos totales (SDT)	Gravimetría	
Sólidos totales (ST)	Gravimetría	
Compuestos fenólicos (CF)	Espectrofotómetro UV-Vis	Folin-Ciocalteu
Metales pesados	Espectrofotómetro de adsorción atómica	NMX-AA-051-SCFI-2016

6.1.2 Medición de compuestos fenólicos

Se determinó con el método de Folin-Ci(Escudero Santiago et al., 2023. Utilizando ácido gálico, reactivo de Folin-Ciocalteu 1N y carbonato de sodio al 7%.

Se elaboró una solución patrón de ácido gálico de 1,000 mg/L para la curva de calibración y a partir de ella se prepararon soluciones con concentraciones de 50 a 700 mg/L. Se añadieron 80 µL de la muestra, 500 µL del reactivo de Folin 1N, se dejó reaccionar en oscuridad por 5 min y después se adicionaron 500 µL de Na_2CO_3 al 7% llevándose a volumen final de 3 mL con agua destilada. Se dejaron reposar en oscuridad por 30 minutos y posteriormente fueron analizadas con un espectofotómetro modelo UV752N a 760 nm. Para analizar la vinaza se utilizó una dilución 1:10 con agua destilada. La concentración es expresada en mg de ácido gálico/L (mg AG/L).

6.2 Selección de los adsorbentes

Se seleccionaron dos adsorbentes: carbón activado granular comercial EBA-9 (CAGC) y carbón activado en polvo comercial IA-4 (CAPC) principalmente por su selectividad por compuestos fenólicos y su enorme área superficial.

6.3 Caracterización de los carbones activados

Se determinó el punto de carga cero (PZC), punto isoeléctrico (IEP) y grupos ácidos y básicos de ambos carbones activados, con el fin de estimar el comportamiento en el proceso de adsorción.

6.3.1 Determinación del PZC

Se determinó con valoración potenciométrica (Amaringo & Hormaza, 2013) (Aylas et al., 2016). Se utilizaron 20 mL de agua destilada para cada una de las soluciones, las cuales fueron ajustadas a pH entre 3 y 11 utilizando NaOH y HCl 0.1 M. Se añadió a cada una de las soluciones 0.5 g de CAPC y se dejaron en agitación durante 24 horas. Se filtraron las muestras y se midió el pH final. Se repitió el procedimiento con el CAGC.

6.3.2 Determinación del IEP

Se determinó utilizando como medio dispersante cloruro de potasio (KCl) $1x10^{-3}$ M y se ajustaron soluciones a diferentes pH de 1.0 a 10.0 con NaOH y HCl 0.1 M. Se añadieron 0.01 g de carbón activado a cada solución y se agitó durante un minuto. Posteriormente se analizó el potencial Z con un equipo ZETA-METER 3.0+ (Amaringo & Hormaza, 2013) (Bumiller, 2012).

6.3.3 Determinación de grupos ácidos y básicos

Se utilizó como referencia el método de titulación de Boehm (Rivera et al., 2021). Añadiendo 0.5 g de CAPC a 50 mL de hidróxido de sodio (NaOH), carbonato de sodio (Na_2CO_3), bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$) y ácido clorhídrico (HCl) 0.1 M. Tras 5 días de reposo con agitación periódica, se tomó una alícuota de 10 mL de cada muestra y se titularon con HCl o NaOH 0.1 M, usando fenoftaleina como indicador. Se repitió el procedimiento con el CAGC.

6.4 Pruebas batch para isotermas de adsorción

Se llevó a cabo a nivel matraz, utilizando 200 mL de vinaza diluida con agua destilada 1:10.

Se utilizaron los dos materiales adsorbentes seleccionados. Utilizando dos temperaturas: 25 ± 2 y 30 ± 1 °C; tres masas: 1.0, 3.0 y 6.0 gramos y tres pH: sin modificar (3.7), 7.0 y 10.0. Esto con el propósito de conocer las mejores condiciones de operación en donde el porcentaje de remoción sea mayor, este valor fue obtenido con (9).

$$\%\, remoción = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100 \qquad (3)$$

En donde C_i es la concentración inicial y C_f es la concentración final obtenida después de llevar a cabo el experimento, expresadas en mg/L.

7. RESULTADOS

7.1 Caracterización de la vinaza

En la Tabla 2 se pueden observar los valores alcanzados en las muestras de vinaza por esta caracterización. Destacando su elevada acidez, cantidades altas de DQO y de compuestos fenólicos, valores cercanos a los reportados por (Durán et al., 2015) y (Robles-González et al., 2012).

Tabla 2. Composición fisicoquímicas de la vinaza

Parámetro	Unidad	Valor
pH	UpH	3.73 ± 0.06
Color	Pt-Co	15,230 ± 945.78
Turbidez	FAU	500 ± 7.74
DQO	mg O_2/L	378,375 ± 21,638.60
CE	mS/cm	2.40 ± 0.04
SST	mg/L	1,785 ± 162.63
SDT	mg/L	65,532.5 ± 2,124.86
ST	mg/L	72,001.67 ± 1,924.35
CF	(mg de AG/L)	4,426.44 ± 376.11
Cobre (Cu)	mg/L	12.82
Cromo (Cr)	mg/L	0.125
Hierro (Fe)	mg/L	26.44
Manganeso (Mn)	mg/L	4.286
Zinc (Zn)	mg/L	4.782
Litio (Li)	mg/L	0.003
Cadmio (Cd)	mg/L	0.175
Plomo (Pb)	mg/L	0.000

7.2 Determinación del PZC

El CAGC presenta un PZC ligeramente básico de 8.2 (Fig. 2). Por debajo de este pH la superficie del carbón activado tendrá una carga positiva y por encima de este tendrá una carga negativa. Mientras que el CAPC presenta un PZC básico de 10.0 (Fig. 3).

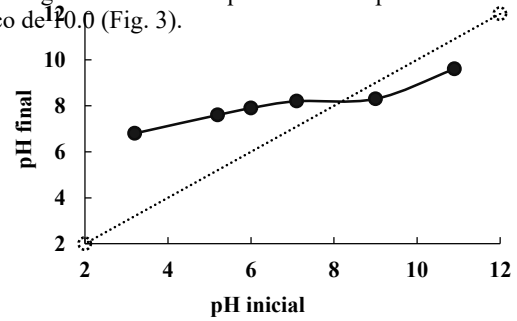


Figura 2. PZC del CAGC

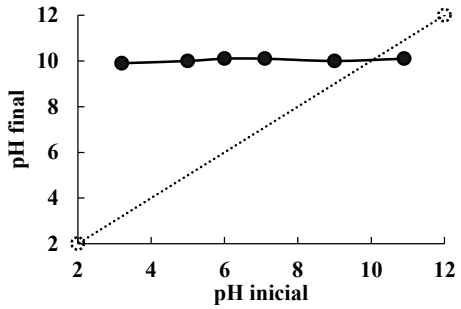


Figura 3. PZC del CAPC

7.3 Determinación del IEP

El CAGC tiene un IEP ácido de 2.2 (Fig. 4) indicando que posiblemente los grupos ácidos se encuentran en los macroporos, que son los poros de mayor tamaño. El CAPC presenta un IEP ácido de 2.1 (Fig. 5), teniendo un comportamiento similar al carbón granular.

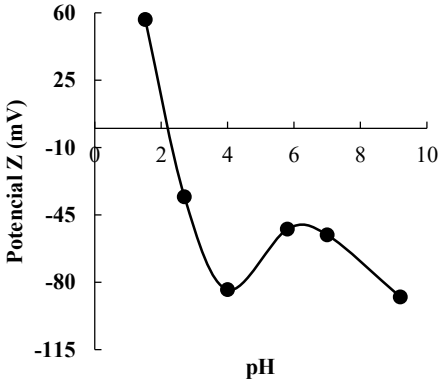


Figura 4. IEP del CAGC

Valores reportados por (Menéndez et al., 1995) demuestran que el IEP y el PZC pueden ser cercanos entre sí o con una gran diferencia entre ellos como, en este caso. En donde discuten que una gran diferencia entre ellos indica una distribución heterogénea de cargas en la superficie del carbono, en donde las zonas externas son más oxidadas que las internas.

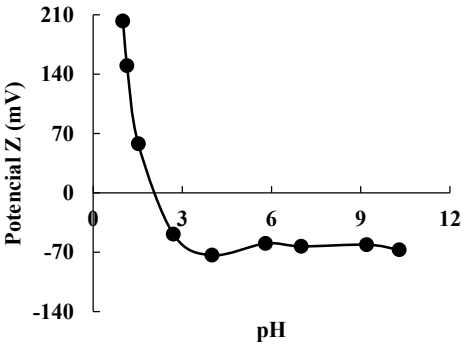


Figura 5. IEP del CAPC

7.4 Determinación de grupos ácidos y básicos

En los datos obtenidos (Tabla 3) se observa que ambos carbones tienen comportamientos similares. A pesar de que predominan grupos ácidos, ambos carbones presentaron un PZC alcalino, lo que nos indica que la fuerza del grupo funcional es determinante para el comportamiento de los carbones activados (Boehm, 1994).

Tabla 3. Grupos ácidos y básicos de CAGC y CAPC

Grupo *(mmol/g)*	**CAGC**	**CAPC**
Lactonas	1.987	1.849
Carboxílicos	0.182	0.193
Fenólicos	1.937	1.846
Básicos	1.730	1.497

8. PRUEBAS BATCH PARA ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

El CAGC mostró el mejor desempeño en todas las condiciones evaluadas, alcanzando una remoción máxima de 83.22 % a pH 3.7, 24 ± 2 °C y 6 g de adsorbente (Tabla 4). En donde T = temperatura. Valores superiores a los reportados por (Caputo, 2020), en donde sus mejores porcentajes de remoción de CF fueron de 42.78% con un carbón granular y 30.32% con un CA en pellets a un pH de 4.74 y T = 25 °C utilizando vinaza de caña de azucar.

Tabla 4. Porcentajes de remoción del CAGC

Condiciones	**1 g**	**3 g**	**6 g**
pH 3.7, T = 24 ± 2 °C	49.80	66.17	83.22
pH 3.7, T = 30 ± 2 °C	60.12	66.40	80.98
pH = 7.0, T = 24 ± 2 °C	33.20	56.30	61.69
pH 7.0, T = 30 ± 2 °C	38.81	55.85	71.56
pH 10.0, T = 24 ± 2 °C	22.66	44.86	55.52
pH 10.0, T= 30 ± 2 °C	33.42	52.71	65.28

El CAPC presentó un 59.00 % a pH de 3.7 y T = 30 ± 1. La Tabla 5 muestra los porcentajes obtenidos en cada condición evaluada para el CAPC. Valores superiores a los reportados por (Caputo, 2020) en donde el mayor porcentaje obtenido fue de 37.77% para un CA en polvo a pH de 4.74 y 25 °C utilizando vinaza de caña de azúcar.

Tabla 5. Porcentajes de remoción del CAPC

Condiciones	**1 g**	**3 g**	**6 g**
pH 3.7, T = 24 ± 2 °C	32.53	48.00	56.30
pH 3.7, T = 30 ± 2 °C	31.63	46.88	59.00
pH = 7.0, T = 24 ± 2 °C	35.22	42.84	47.33

pH 7.0, T = 30 ± 2 °C	34.32	43.29	56.30
pH 10.0, T = 24 ± 2 °C	8.52	20.86	39.48
pH 10.0, T= 30 ± 2 °C	27.82	36.11	43.52

En ambos adsorbentes, el incremento de masa y un pH ácido favorecieron la remoción, mientras que la temperatura no tuvo un efecto significativo en el CAPC.

Se graficaron los isotermas y las cinéticas de adsorción correspondientes para conocer el mecanismo de adsorción en cada experimento. Considerando los resultados, en el punto 7.1 se mostraron los isotermas y las cinéticas de adsorción de las condiciones óptimas, representando la mayor capacidad de remoción del estudio que ayudarán a describir mejor el comportamiento del sistema.

8.1 Isotermas de adsorción

Los datos experimentales se ajustaron a los modelos de Langmuir, Freundlich y Temkin.

El isoterma de adsorción que mejor ajuste tuvo para el CAGC fue el isoterma de Langmuir (Fig. 6), presentando un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9452.

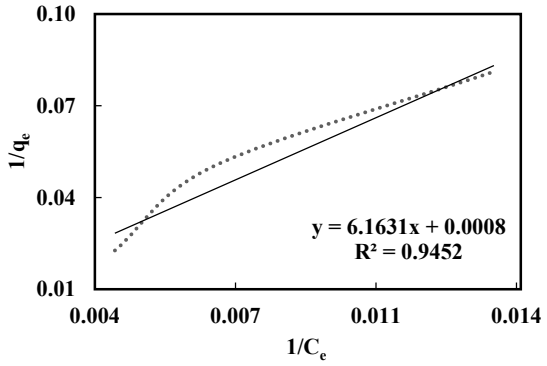


Figura 6. Isoterma de Langmuir para CAGC

Este modelo supone que la adsorción ocurre en monocapa y los sitios del adsorbente son heterogéneos (Walter J & Weber Jr, 2003). La cinética con mejor ajuste fue de pseudo-segundo orden (Fig. 7) obteniendo un R^2 cercano a 1 (Tabla 6) lo que indica que el mecanismo predominante es la quimisorción.

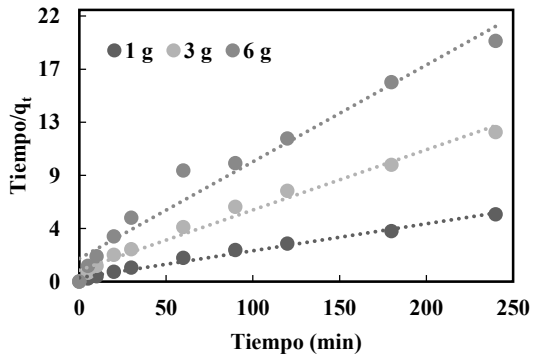


Figura 7. Cinética de pseudo-segundo orden para CAGC

Tabla 6. Parámetros de cinéticas de adsorción del CAGC

Modelo cinético	Parámetro	Masa (g)		
		1	3	6
Pseudo-primer orden	k_1	0.015	0.013	0.010
	q_e	29.288	14.232	8.935
	R^2	0.950	0.935	0.947
Pseudo-segundo orden	k_2	0.002	0.003	0.013
	q_e	45.670	20.515	12.758
	R^2	0.987	0.981	0.965
Modelo de Elovich	B	0.135	0.289	0.472
	α	11.860	3.506	1.866
	R^2	0.959	0.980	0.947

En la tabla 6 se observa que constante de velocidad de pseudo-segundo orden (k_2) aumenta conforme la masa del adsorbente, lo que nos indica que al aumentar la masa aumenta la velocidad de adsorción debido a una mayor disponibilidad de sitios activos, por la misma razón, la capacidad teórica de equilibrio (q_e) disminuye, lo que sugiere una saturación parcial de los sitios superficiales.

Para el CAPC el isoterma que mejor ajuste tuvo fue Freundlich, con un R^2 = 0.9839 (Fig. 8).

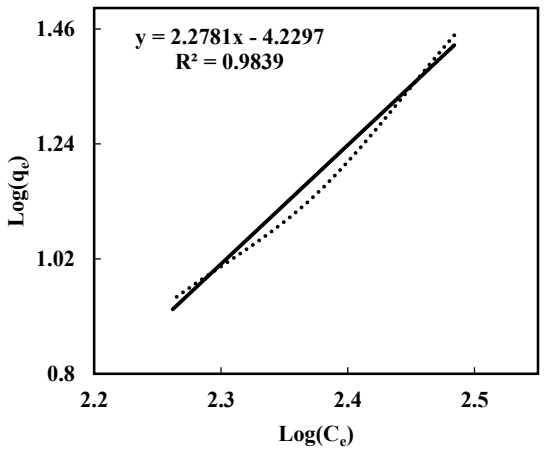


Figura 8. Isoterma de Freundlich para CAPC

La cinética con mejor ajuste para el CAPC fue de pseudo-segundo orden (Fig. 9). Este comportamiento sugiere que las interacciones entre los CF y el CA no se limitan a fenómenos físicos, sino que involucran enlaces fuertes, probablemente

mediante interacciones π- π y puentes de hidrógeno (De La Luz-Asunción et al., 2015).

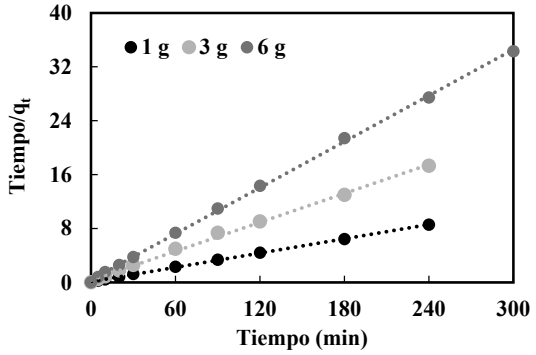


Figura 9. Cinética de pseudo-segundo orden para CAPC

En la Tabla 7 se muestran los valores de los parámetros correspondientes a los modelos cinéticos para CAPC en donde se puede observar que la constante de velocidad y la capacidad teórica de adsorción varían en función de la masa del adsorbente.

Tabla 7. Parámetros de cinéticas de adsorción del CAPC

Modelo cinético	Parámetro	Masa (g)		
		1	3	6
Pseudo-primer orden	k_1	0.010	0.008	0.004
	q_e	5.798	3.598	1.502
	R^2	0.597	0.524	0.189
Pseudo-segundo orden	k_2	0.012	0.015	0.035
	q_e	28.266	13.980	8.770
	R^2	1.000	0.998	0.999
Modelo de Elovich	B	0.247	0.499	0.822
	α	39.223	15.636	11.975
	R^2	0.711	0.747	0.743

Para complementar el análisis sobre los mecanismos de adsorción es indispensable evaluar el equilibrio de adsorción mediante modelos de isotermas. Esto se logra calculando los parámetros correspondientes a cada uno de los modelos para cada carbón activado en las condiciones óptimas. (Tabla 8).

Tabla 8. Parámetros de isotermas de adsorción del CAGC y CAPC

Modelo	Parámetro	CAGC	CAPC
		Valor	
Langmuir	Q_{max}	1324.139	-12.355
	k_L	0.00012	-0.002
	R^2	0.945	0.999
	R_L	0.948	-170.881
Freundlich	k_F	0.352	0.015
	n	0.892	0.439
	R^2	0.925	0.984
Temkin	b	90.360	66.845
	A	0.019	0.007
	R^2	0.828	0.928

Observando que, como se mencionó anteriormente, el isoterma de Langmuir tuvo mejor ajuste para el CAGC. El valor de R_L en este modelo indica una adsorción favorable y una elevada capacidad de adsorción teórica (Q_{max} = 1,324.13 mg/g) confirmando que el CAGC tiene una alta afinidad por CF.

El CAPC tuvo un ajuste de 0.984 con el isoterma de Freundlich. El valor de n = 0.439 nos indica una adsorción desfavorable, posiblemente por interacciones físicas débiles o bloqueo de poros por las altas concentraciones de compuestos que contiene la vinaza. Sin embargo, el alto coeficiente nos dice que el modelo de Freundlich describe mejor el comportamiento del CAPC bajo esas condiciones. A pesar de que el isoterma de Langmuir tiene un R^2 mayor, no describe el comportamiento debido a los valores negativos en los parámetros.

9. CONCLUSIONES

La presente investigación muestra que el carbón activado y el proceso de adsorción son una alternativa para reducir de manera significativa la concentración de compuestos fenólicos presentes en la vinaza mezcalera empleada a pesar de la complejidad del efluente. Se alcanzaron eficiencias de remoción superiores al 80%., contribuyendo a la reducción del impacto ambiental generado. El CAGC mostró el mejor desempeño en todas las condiciones evaluadas alcanzando mayor remoción a pH de 3.7 y temperatura de 24 ± 2 °C y el CAPC a pH de 3.7, 30 °C y 6 g de adsorbente. El incremento de masa y un pH ácido favorecieron la adsorción, mientras que la temperatura no tuvo un efecto significativo en el CAPC. La comparación de ambos adsorbentes permitió comprender cómo las propiedades superficiales de los materiales influyen directamente en la eficiencia del proceso. Como siguiente etapa, se evaluará la desorción de los compuestos retenidos y la regeneración de los adsorbentes, para así poder determinar la viabilidad económica del proceso. Posteriormente, la utilización de las condiciones óptimas será utilizadas en una configuración semicontinua para establecer los mejores parámetros de operación más cercanos a condiciones industriales.

REFERENCIAS

Amaringo, F., & Hormaza, A. (2013). Determinación del punto de carga cero y punto isoeléctrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, *4*(2), 27. https://doi.org/10.22490/21456453.982

Aylas, E., Picasso, G., & Sun María del Rosario. (2016, May 2). Modificación ácida del carbón activado y la influencia del grupo sustituyente en la adsorción de compuestos fenólicos. *Revista de La Sociedad Química de Perú*, *82*(3), 2016.

Boehm, H. P. (1994). SOME ASPECTS OF THE SURFACE CHEMISTRY OF CARBON BLACKS AND OTHER CARBONS. *Carbon*, *32*(5), 759–769.

Bumiller, M. (2012). *Review: ISO 13099 Colloidal systems-Methods for zeta potential determination*. www.horiba.com/particle

Caputo, M. (2020). *Estudio de la composición orgánica de la vinaza y metodologías para eliminar sus efectos contaminantes* [Tesis doctoral]. Universidad Nacional de la Plata.

CONADESUCA. (2016). *VINAZAS: ALTERNATIVAS DE USO* (pp. 1–12).

De La Luz-Asunción, M., Sánchez-Mendieta, V., Martínez-Hernández, A. L., Castaño, V. M., & Velasco-Santos, C. (2015). Adsorption of phenol from aqueous solutions by carbon nanomaterials of one and two dimensions: Kinetic and equilibrium studies. *Journal of Nanomaterials*, *2015*, 1. https://doi.org/10.1155/2015/405036

Díaz, S., Garzón, M., & Moreno, I. (2020). Tratamiento de aguas residuales de la industria del mezcal. *Revista Latinoamericana El Ambiente y Las Ciencias*, *11*(28), 1–5. http://www.rlac.buap.mx

Durán, M. F., Sanabria, I. J., & Gutiérrez, N. (2015). Evaluación de la producción de metano en la digestión anaerobia de vinazas pretratadas con ozono. *EIA*, *12*(24), 167–177. https://doi.org/10.14508/reia.2015.12.24.167-177

Edet, U. A., & Ifelebuegu, A. O. (2020). Kinetics, isotherms, and thermodynamic modeling of the adsorption of phosphates from model wastewater using recycled brick waste. *Processes*, *8*(6), 1. https://doi.org/10.3390/PR8060665

Escudero Santiago, Carlos Javier, López Chávez, Diego Alejandro, & Gómez Vázquez. (2023). Tratamiento biólogico y mediante procesos de oxidación avanzada de vinazas mezcaleras. *Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico En Oaxaca*, *7*, 1–135.

Jabbari, R., & Ghasemi, N. (2024). Evaluating the Efficiency of Two-Parameter Adsorption Isotherm Models in the Adsorption of Methylene Blue. *Iran. J. Chem. Chem. Eng*, *43*(4), 1–17.

Menéndez, J. A., Illán-Gómez, M. J., y León, C. A. L., & Radovic, L. R. (1995). On the difference between the isoelectric point and the point of zero charge of carbons. *Carbon*, *33*(11), 1655–1657. https://doi.org/10.1016/0008-6223(95)96817-R

Rivera, M., León, C., & Villalba, O. (2021). *Montaje del método analítico Boehm, para la determinación de la química superficial en sólidos porosos y aplicación en el estudio de carbones activados obtenidos a partir de cáscara de Mangostino*. Universidad Piloto de Colombia.

Robles-González, V., Galíndez-Mayer, J., Rinderknecht-Seijas, N., & Poggi-Varaldo, H. M. (2012). Treatment of mezcal vinasses: A review. *Journal of Biotechnology*, *157*(4), 524–546. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2011.09.006

Rodríguez, A. (2019). *Tratamiento de vinaza de tequila por medio de Coagulación-floculación y fotocatálisis heterogénea empleando Nanopartículas de TiO2* [Tesis doctoral]. Universidad de Guadalajara.

Tubert, I., & Talanquer, V. (1989). Sobre adsorción. In *Educación Química* (4th ed., Vol. 8, pp. 1–5).

Walter J, & Weber Jr. (2003). *Control de la calidad del agua, procesos fisicoquímicos* (Vol. 1).

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Pricing strategies to improve the performance of rural microenterprises: a theoretical review

Mendoza Ramírez, Cynthia Arleth* Barradas Martínez, María del Rosario*, Rodríguez Lázaro, José*

** Universidad Tecnológica de la Mixteca, Avenida Dr. Modesto Seara No. 1, C.P. 6004, Huajuapan de León, Oaxaca, e-mail: merc010907@gs.utm.mx*

Abstract: Pricing strategies are one of the crucial strategic decisions for the financial performance and market survival of rural microenterprises, as appropriate product pricing will allow them to recover their costs and expenses and generate profits. The objective of this research is to identify the most appropriate pricing strategies for these types of businesses. The results show that pricing strategies based on cost, perceived value, competition, and penetration are the most commonly used by rural microenterprises. It is concluded that appropriate pricing not only improves the economic performance of rural microenterprises, but that income generation also contributes to the economic growth of communities, directly impacting local and regional economic development.

Keywords: Rural microenterprises, pricing, perceived value, competition, costs, penetration pricing.

1. INTRODUCCIÓN

La fijación de precios es una de las decisiones estratégicas más importantes para cualquier empresa, ya que influye directamente en la rentabilidad, la competitividad y la permanencia en el mercado (Rodríguez, 2015).

En el contexto de las microempresas rurales, esta decisión adquiere mayor importancia debido a que "desempeñan un rol fundamental en la dinamización económica y social, generando empleo e incluso logrando la inclusión" (Maldonado-Mina, 2025, p. 342).

En este sentido, pese a la importancia que tienen estas estrategias en la rentabilidad y permanencia de una empresa, múltiples estudios (Navas et al., 2021; García y Arrubla, 2016) evidencian que la mayoría de las microempresas rurales fijan sus precios de manera empírica, basándose únicamente en los costos visibles o en los precios de la competencia, sin considerar otros factores internos y externos.

Córdoba y Moreno (2017) mencionan que "una empresa para estar a la vanguardia y al nivel de sus rivales, con bienes y servicios de alto valor agregado y notable especialización, requiere de una buena estrategia de fijación de precios" (p. 67).

El interés de esta investigación surge de identificar que la falta de aplicación de estrategias adecuadas de fijación de precios en microempresas rurales, limita su desempeño financiero y su potencial de desarrollo.

A partir del planteamiento anterior, el objetivo de esta revisión teórica es analizar las principales estrategias de fijación de precio aplicables a microempresas rurales, con el propósito de identificar la más adecuada para mejorar su desempeño financiero.

2. MICROEMPRESAS RURALES

2.1 Microempresas rurales y la fijación de precios

A nivel mundial, las micro, pequeñas y medianas empresas (MiPyMEs) son fundamentales para la economía de varios países, ya que generan empleo, mantienen cadenas de producción locales y son consideradas la columna vertebral de la economía mundial (Organización Internacional del Trabajo, 2023). Esta relevancia a nivel mundial resalta la necesidad de implementar estrategias específicas que enfrentes los desafíos únicos de las MiPyMEs.

De acuerdo con la Ley para el Desarrollo de la Competitividad de las Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (2023), las MiPyMES se clasifican en función al número de trabajadores y a su sector económico, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de las MiPyMEs en México

Estratificación por Número de Trabajadores			
Sector/ Tamaño	Industria	Comercio	Servicios
Micro	0-10	0-10	0-10
Pequeña	11-50	11-30	11-50
Mediana	51-250	31-100	51-100

Nota. Ley para el Desarrollo de la Competitividad de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa [Ley PyME] Reformado, Diario Oficial de la Federación [D.O.F], 20 de octubre de 2023 (México).

En este sentido, una microempresa son todas aquellas unidades de producción de bienes o servicios, que emplean entre 1 y 10 personas, generalmente son de tipo familiar y generan una importante fuente de empleos e ingresos para la economía local y nacional.

Según la World Economic Forum (WEF), las MiPyMEs generan alrededor del 70% del empleo y del PIB a nivel mundial (World Economic Forum, 2022). Mientras que la Organización Internacional del Trabajo (OIT) menciona que, en los países de ingresos bajos y medios, esta cifra se eleva aún más, ya que las microempresas generan casi la totalidad del empleo productivo (OIT, 2019).

De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), en América Latina las MiPyMEs representan el 99.5% de las empresas, mientras que las microempresas casi el 90% del total (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, 2024). Lo que demuestra la importancia de las microempresas para el desarrollo económico de la población.

En México, según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2020), en el año 2019 se tenían contabilizadas un total de 6,373,169 unidades económicas que empleaban a 36,038,272 personas; de estos establecimientos el 94.9% corresponden a microempresas. Datos recientes de Statista complementan esta cifra, en el 2023 más del 97% de las empresas del país son microempresas (Sánchez, 2025).

Estas cifras muestran que las microempresas son fundamentales para la economía del país, ya que conforman la mayor parte del tejido empresarial y generan empleos para más de un tercio de la población activa en el país.

Estas microempresas no solo impulsan el desarrollo local y regional, sino que también contribuyen de manera significativa a la estabilidad económica; tienen un papel clave en la creación de oportunidades laborales, especialmente en comunidades más pequeñas, donde suelen ser una fuente generadora de ingresos y crecimiento tanto a nivel nacional como regional (INEGI, 2019).

Estamos en un mundo en constante cambio con una rápida urbanización, de acuerdo con Divyathejomurthy (2025), “64% of the population still lives in villages, with 80% of the rural population relying on agriculture and allied sectors for their livelihood” (2025, p. 1), lo que las microempresas rurales juegan un papel fundamental en la mejora de la economía, la calidad de vida de la población rural y reducción de la migración.

En este contexto se entiende que las microempresas rurales son “unidades económicas de pequeña escala que tienen una vinculación directa con el territorio, desempeñan un rol fundamental en la dinamización económica y social, generando empleo e incluso logrando la inclusión” (Maldonado-Mina, 2025, p. 342).

Estas microempresas enfrentan múltiples retos como falta de recursos financieros, planificación y conocimiento del mercado, lo que perjudica su capacidad de crecimiento fuera de la zona rural (Divyathejomurthy, 2025). En este sentido, Ghulam et al., también identifica que los microempresarios productores rurales enfrentan barreras como: infraestructura deficiente, bajos niveles tecnológicos, altos costos de transporte y el acceso limitado a financiamiento (2024), lo que limita su capacidad para fijar precios competitivos y sostenibles.

Estas barreras no solo son obstáculos logísticos, sino que también tienen un impacto en la percepción del riesgo de los microempresarios, ya que el cambio de un factor externo no controlable puede afectar la determinación del precio.

En este sentido, es importante señalar que una estrategia de precio, es un “proceso por el que una empresa establece el precio de sus productos” (BBVA, 2023, párr. 3); esta “abarca decisiones sobre la fijación de los precios iniciales y la adaptación de estos en respuesta a las oportunidades y los desafíos de la competencia” (Kotler y Keller, 2012, p. A6).

Para que los emprendimientos tengan éxito, deben ser resilientes ante la incertidumbre del mercado y disminuir el riesgo de cerrar el negocio, esto implica generar suficientes ventas y así conseguir los recursos suficientes para la operación (Kato y Fernández, 2016). Ante tal situación, es de suma importancia fijar el precio correctamente.

Como menciona Tello y Tello (2014) las microempresas rurales “no tienen la capacidad de negociación para la fijación de precios en los productos que deben enviar al mercado antes de que se malogren” (p. 242). Aunado a eso Navas et al. (2021), menciona que los precios de venta se determinan de acuerdo a decisiones administrativas y que los márgenes de utilidad de los productos se basan en supuestos. La toma de decisiones basada en estos supuestos representa un riesgo inherente de ineficiencia y falta de competitividad

Enfocarse en la mejora del desempeño de estas microempresas contribuye en la generación de empleos, producción de bienes para las mismas comunidades y mejorar la economía de la población. Entender cómo la fijación de precios puede mejorar el desempeño de las microempresas rurales resulta esencial en diseñar e implementar estrategias y políticas innovadoras (Ghulam et al., 2024).

Una fijación de precios adecuada no solo impacta los ingresos y la rentabilidad, sino también la inclusión, la equidad y la dinamización de las economías rurales. Aunado a lo anterior, Córdoba y Moreno (2017) mencionan que “un buen esquema de fijación de precios puede generar ventajas significativas que son determinantes para el rumbo de cualquier compañía” (párr. 50). Esta estrategia es de vital importancia para las empresas, porque forman parte de transformación de la experiencia y el fomento de la lealtad de los clientes (Flores-Rueda et al., 2024).

3. METODOLOGÍA

El presente artículo se desarrolló mediante una metodología de revisión teórica, enfocada en analizar las estrategias de fijación de precios en las microempresas rurales. Se consultaron artículos científicos, así como informes de organismos internacionales (OIT, OCDE, INEGI, WEF).

La revisión consistió en tres etapas: 1. Búsqueda de la información en artículos con palabras clave como determinación de precios, microempresas rurales, fijación de precios, estrategias de precios; 2. Selección de los documentos que cumplieron con los criterios de búsqueda; y 3. El análisis de las estrategias de fijación de precios más utilizadas y citadas en la literatura sobre microempresas rurales.

4. ESTRATEGIAS DE FIJACIÓN DE PRECIO

En la revisión de la literatura se identificó que existe un gran número de tipos de estrategias de determinación de precios; sin embargo, en esta investigación solo se abordan las más utilizadas en microempresas. Cada tipo de estrategia se adapta a diferentes objetivos de mercado, situaciones competitivas y percepciones del consumidor.

4.1 Precio basado en el costo

En la tabla 2 se muestra un concentrado que integra el precio basado en el costo de acuerdo a diversos autores y evidencia la importancia de comprender las múltiples perspectivas al determinar el precio de un producto o servicio.

Tabla 2. Precio basado en el costo según autores

Autor (es)/año	Descripción
Kotler y Armstrong (2007)	Se establece un precio sumando un margen de utilidad al costo del producto.
Goñi (2008)	Se establece un precio sumando un margen de ganancias al costo unitario.
BBVA (2023)	Se determina sumando los costos y un porcentaje de margen de beneficio.
Monares et al., (2001)	Se calcula sumando los costos fijos, los variables y un porcentaje adicional de beneficio.

Nota: Elaboración propia con base en “Marketing, Versión para Latinoamérica” por Kotler, P., y Armstrong, G, 2007, Pearson. “El precio: variable clave en marketing” por Goñi, N, 2008, Centrum. “Estrategia de precio: qué es, ejemplos y tipos” por Banco Bilbao Vizcaya Argentina, 2023, 7 de septiembre (https://www.bbvaspark.com/contenido/es/noticias/estrategiade-precio-ejemplos-tipos/). “Gestión de nuevos proyectos para la microempresa rural” por Monares, P., Monares, A., y Mayorga. M., 2021, Programa de apoyo a la microempresa.

Microempresas de cultivo establecen sus precios basándose en sus costos totales y agregándoles al final un adicional para la recuperación de sus costos totales a partir de la venta de cada producto (Navas et al., 2021). Sin embargo, todo esto lo realizan de manera empírica, generando incertidumbre en cuanto a la validez del cálculo o si representa la mejor estrategia para el objetivo.

Para complementar lo anterior, se debe mencionar que las microempresas dedicadas a elaborar textiles también determinan sus precios basándose en el costo, suman todos sus costos y al final le agregan un porcentaje de ganancia, de igual manera lo hacen de forma empírica o en base a su experiencia (Curo y Garnica, 2021).

4.2 Precio basado en el valor percibido

Las microempresas que modifican sus precios según el cliente, utilizan una estrategia denominada precio basado en el valor percibido, ya que contemplan la disposición y capacidad de pago de cada consumidor (Kato y Fernández, 2016).

Tabla 3. Precio basado en el valor percibido

Autor (es)/año	Descripción
Kotler y Armstrong (2007)	Los precios se determinan a partir de la percepción de valor de los compradores en lugar de los costos del vendedor.
Goñi (2008)	Se basa en la percepción del cliente sobre el valor de un producto.
BBVA (2023)	Se establece de acuerdo a lo que el cliente percibe del producto o servicio, según el valor que le asignen.
Monares et al., (2001)	Se calcula en base al valor percibido de cuanto pagaría el cliente por el producto o servicio.

Nota: Elaboración propia con base en “Marketing, Versión para Latinoamérica” por Kotler, P., y Armstrong, G, 2007, Pearson. “El precio: variable clave en marketing” por Goñi, N, 2008, Centrum. “Estrategia de precio: qué es, ejemplos y tipos” por Banco Bilbao Vizcaya Argentina, 2023, 7 de septiembre (https://www.bbvaspark.com/contenido/es/noticias/estrategiade-precio-ejemplos-tipos/). “Gestión de nuevos proyectos para la microempresa rural” por Monares, P., Monares, A., y Mayorga. M., 2021, Programa de apoyo a la microempresa.

Aunque su implementación no es fácil, la experiencia y el conocimiento del mercado permiten aplicar esta estrategia con éxito, ya que brindan la oportunidad de capturar mayores ingresos al ajustar el precio al valor percibido por el consumidor, en lugar de mantener una única (Kato y Fernández, 2016).

De acuerdo con Kato y Fernández (2016), esta es una de las estrategias de fijación de precios que consigue maximizar el volumen de ingresos. No obstante, para que ésta funcione es necesario diferenciarse de los competidores, de tal forma que el cliente perciba mayor valor y pague más por nuestros productos.

4.3 Precio basado en la competencia

En este tipo de estrategia las empresas fijan los precios de sus productos con base en la competencia, al respecto García y Arrubla (2016) señalan que las microempresas rurales de servicios fijan sus precios “sin tener bases sólidas en cuanto factores internos y externos que propicia el dinamismo del

entorno económico empresarial […], esta se realiza sin fundamentos contables, económicos, y en la mayoría de las veces se da por referencia a la competencia" (p. 173).

El precio basado en la competencia "consiste en establecer los precios basándose principalmente en los de la competencia, tomando en menor consideración el costo del producto y el consumidor" (García y Arrubla, 2016, p. 180). En la tabla 4 se recopilan distintas conceptualizaciones de este tipo de estrategia según el criterio de los autores citados.

Tabla 4. Precio basado en la competencia

Autor (es)/año	Descripción
Fisher y Espejo (2011)	Se adoptan precios similares a los de los competidores, siguiendo las estrategias del líder del mercado.
Kotler y Armstrong (2007)	Se definen en función de los precios de los competidores, prestando menos atención a los costos propios o la demanda.
Goñi (2008)	Los precios se ajustan de acuerdo a la competencia, es conocido como statu quo
BBVA (2023)	Pueden ser: precio medio (igual al de los competidores), precio descontado (menor que el de los competidores) y precio primado (superior al de la competencia).
Monares et al., (2001)	Se establecen a partir de precios ya existentes, basándose en los precios de la competencia, con menos atención en sus propios costos.

Nota: Elaboración propia con base en "Mercadotecnia" por Fisher, L., y Espejo, J, 2011, Mc Graw Hill. "Marketing, Versión para Latinoamérica" por Kotler, P., y Armstrong, G, 2007, Pearson. "El precio: variable clave en marketing" por Goñi, N, 2008, Centrum. "Estrategia de precio: qué es, ejemplos y tipos" por Banco Bilbao Vizcaya Argentina, 2023, 7 de septiembre (https://www.bbvaspark.com/contenido/es/noticias /estrategia-de-precio-ejemplos-tipos/). "Gestión de nuevos proyectos para la microempresa rural" por Monares, P., Monares, A., y Mayorga. M., 2021, Programa de apoyo a la microempresa.

Esta estrategia propone que, en los mercados con productos iguales, las microempresas acaban estableciendo precios similares debido a que los clientes casi siempre elegirán al proveedor que ofrezca sus productos más baratos. Esta perspectiva asume que no existen costos de traslado, que el servicio y la experiencia de compra son semejantes y que los productos no se distinguen entre sí, lo que provoca que la compra sea completamente sustituible entre competidores (Kato y Fernández, 2016).

4.4 Precio de penetración

Para algunas microempresas "un mayor precio significa más ingresos, esos ingresos podrían ser cero dado que no habría ventas cuando los compradores en el entorno de la empresa tienen una disposición a pagar menor que el precio de venta" (Kato y Fernández, 2016, p.691).

Sin embargo, para otras empresas es completamente diferente, estas establecen precios bajos para vender más, a este tipo de estrategia se le conoce como precio de penetración, en la tabla 5 se muestra una recopilación de conceptos según autores.

Tabla 5. Precio de penetración

Autor (es)/año	Descripción
Goñi (2008)	Los productos se ofrecen a precios bajos para aumentar los volúmenes de venta.
Fisher y Espejo (2011)	Se ofrecen precios bajos para captar un mercado masivo, generando altos volúmenes de ventas que incrementen el ingreso total.
BBVA (2023)	Se establece un precio bajo inicialmente y se aumenta gradualmente con el tiempo.
Lozana (2017)	Se aplica principalmente en mercados masivos donde el consumidor muestra una alta sensibilidad al precio, se ofrecen precios bajos al inicio para estimular rápidamente la demanda.

Nota: Elaboración propia con base en "El precio: variable clave en marketing" por Goñi, N, 2008, Centrum. "Mercadotecnia" por Fisher, L., y Espejo, J, 2011, Mc Graw Hill. "Estrategia de precio: qué es, ejemplos y tipos" por Banco Bilbao Vizcaya Argentina, 2023, 7 de septiembre (https://www.bbvaspark.com/contenido/es/noticias/estrategiade-precio-ejemplos-tipos/). "Estrategia de precio" por Lozana, M., 2017, Fundación Universitaria del Área Andina.

La estrategia de precio de penetración, aunque es atractiva por su potencial para captar una gran cuota del mercado, requiere de ciertas condiciones: para que sea rentable se debe de demandar un alto volumen de ventas que compensen los bajos márgenes de ganancia unitarios.

Sin embargo, la mayoría de los microempresarios la implementan incorrectamente, debido a factores como la baja producción inicial que origina altos costos en el producto y mínima ganancia, lo que provoca que el crecimiento sea lento y aunque se logre recuperar la inversión muchos microempresarios no contemplan todos los gastos involucrados, lo que afecta aún más la ganancia si es que existiera. Por lo tanto, el implementar una estrategia de este tipo no es conveniente con una baja capacidad productiva y no se consideran otros factores externos e internos.

4.5 Recomendaciones

La correcta determinación de precios en microempresas rurales, tienen que considerar la variedad de sectores y giros productivos con los que operan, puesto que no hay una única estrategia que asegure el éxito en todos los contextos.

Asimismo, es necesario fomentar el desarrollo de habilidades empresariales que permitan a los microempresarios hacer un análisis integral de su negocio y del contexto antes de determinar sus precios, para así considerar otros factores. Aunado a esto Merino et al., (2022) mencionan que es indispensable que los microempresarios se capaciten para que así ayuden a sus microempresas a encaminarlas hacia la obtención de mejores resultados.

Otro punto muy importante es que los microempresarios comprendan que establecer los precios no es un proceso fijo, sino dinámico y flexible.

Por último, se sugiere formar alianzas entre microempresas, instituciones gubernamentales y organizaciones de apoyo que ofrezcan asesoramiento, para así acceder a información más confiable y actualizada, lo que permitirá tomar decisiones de precios más precisos y "reducir la mortalidad e iniciar procesos de crecimiento de las organizaciones" (Kato y Fernández, 2016. P. 714)

5. RESULTADOS

La revisión de literatura permitió identificar cuatro estrategias de fijación de precios que predominan en las microempresas rurales: precio basado en el costo, en la competencia, en el valor percibido y de penetración.

El precio basado en el costo es una de las estrategias más utilizadas por su simplicidad, ya que se calculan los costos de producción y se agrega un margen de ganancia, se detectó que las microempresas que más ocupan este tipo de estrategias son las de agricultura y textiles (Navas et al., 2021; Curo y Garnica, 2021). Y a pesar de que lo han aplicado empíricamente, les ha funcionado, lo que conlleva a que si se aplicara correctamente su estrategia de fijación de precios se vería diferenciada ayudando así aún más a estos microempresarios.

Por otro lado, el precio basado en la competencia, también es uno de los más utilizados en estas microempresas, ya que les permite darse una idea en cuanto fijar sus precios. Las microempresas que utilizan este tipo de estrategias son alojamientos rurales (García y Arrubla). Sin embargo, aunque es sencillo de aplicar no es la que se desempeña de mejor manera, ni la que mejor rendimiento deja (Kato y Fernández, 2016).

Por el contrario, el precio basado en el valor percibido, es la estrategia que mejor se desempeña y mejores márgenes de ganancia deja, ya que de acuerdo con Kato y Fernández (2016), "la modalidad de fijación de precios que maximiza el volumen de ingresos es aquella que reconoce los diferentes grupos de compradores y que establece precios diferentes de una misma mercancía" (713). De acuerdo con Kotler y Armstrong (2016) citado por Torres y Silva (2024) la estrategia que más recomiendan es esta.

Por último, se tiene que la estrategia de penetración es la aplicación de precios bajos al iniciar el negocio, de acuerdo con Terán y García (2020) en sus resultados muestran que los clientes perciben el precio demasiado bajo lo que provoca una mala percepción del producto en comparación con la competencia.

Para finalizar, Córdoba y Moreno (2017) mencionan que "en la práctica, no existe una fórmula ideal de fijación de precios, la estrategia acertada será aquella que se adapte de la mejor manera al objetivo que quiera alcanzar la empresa en un momento determinado" (p. 58).

6. CONCLUSIONES

Esta investigación evidencia la importancia de una adecuada estrategia de fijación de precios para las microempresas rurales, ya que de esta dependerá su desempeño financiero, permanencia en el mercado y crecimiento a largo plazo. Se detectaron cuatro estrategias principales que ocupan las microempresas rurales: basada en el costo, en el valor percibido, en la competencia y de penetración.

A pesar de que los microempresarios rurales suelen establecer sus precios de manera empírica, basándose principalmente en los costos o en los de competencia (Kato y Fernández, 2016)., se menciona que una estrategia adecuada no solo mejora su desempeño económico, sino que también contribuye al desarrollo rural de la población. Además, también se evidencia que la fijación de precios, tiene un efecto directo en la rentabilidad, los ingresos, así como en la equidad y dinamización de las economías rurales.

"Otros elementos que pudieran explicar la determinación de precios y el desempeño son: el elevado número de competidores, la dificultad para conocer la disposición a pagar de los compradores y el sector al que pertenezca la empresa" (Kato y Fernández, 2016, p. 687).,

Finalmente, se debe destacar que las estrategias de determinación de precio inciden de manera importante en el desempeño financiero de las microempresas; se consideran un factor esencial en la recuperación de costos y gastos, así como para obtener una utilidad; que, a su vez, permitirá que las microempresas cumplan con el objetivo que tienen en las comunidades como fuentes generadoras de ingresos e impulsoras de desarrollo local y regional.

REFERENCIAS

Banco Bilbao Vizcaya Argentina. (2023, 7 de septiembre). *Estrategia de precio: qué es, ejemplos y tipos.* https://www.bbvaspark.com/contenido/es/noticias/estrategia-de-precio-ejemplos-tipos/

Córdoba, S., y Moreno, M. (2017). La importancia de una buena estrategia de fijación de precios como herramienta de penetración de mercados. *Revista TENDENCIAS, 18*(2), 58-68. https://doi.org/10.22267/rtend.171802.73

Curo, R., y Garnica, E. (2021). Métodos de costos para la fijación de precios en las MYPEs textiles. [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana Unión]. *Repositorio*

institucional UPEU. https://repositorio.upeu.edu.pe/server/api/core/bitstreams/5935f86a-867b-40eb-97cb-b2483930b38a/content

Divyathejomurthy. V. (2025). El papel de las microempresas y las pequeñas empresas (pymes) en el desarrollo rural [Role of micro and small-scale enterprise (MSEs) in rural development]. *Revista internacional EPRA de revisión económica y empresarial, 6*(3), B68-B72. https://eprajournals.com/IJES/article/8034/abstract

Fisher, L., y Espejo, J. (2011). *Mercadotecnia*. Mc Graw Hill.

Flores-Rueda, I. C., Sánchez-Macías, A., Peñalosa-Otero, M. E., y Cheverría-Rivera S. (2024). ¿Eres lo que pagas? Análisis de conocimiento de precios y perfiles de consumidores. *Retos Revista de Ciencias de la Administración y Economía, 14*(27), 69-83. https://doi.org/10.17163/ret.n27.2024.05

García, M., y Arrubla. M. (2016). Fijación de los precios en alojamientos rurales en el departamento del Quindío. *Contexto, 5*, 173-181. https://sophia.ugca.edu.co/index.php/contexto/article/view/658/988

Ghulam. R., Kratzer. J., y Syed. Z. (2024). Agroempresarial en países en desarrollo: una revisión sistemática de las limitaciones de los pequeños productores [Agrientrepreneurship in developing countries – a systematic review of smallholders' constrain]. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies.* https://doi.org/10.1108/JADEE-06-2024-0185

Goñi, N. (2008). *El precio: variable clave en marketing*. Centrum.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2019). *Micro, pequeña, mediana y gran empresa, Censos económicos 2019.* https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ce/2009/doc/minimonografias/m_pymes.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020, 16 de julio). *INEGI presenta los resultados definitivos de los censos económicos 2019* [Comunicado de prensa]. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2020/OtrTemEcon/CenEconResDef2019_Nal.pdf

Kato, E. y Fernández, M. (2016). Fijación de precios y desempeño en micronegocios: Un estudio con microdatos. *Revista Análisis Organizacional,* 686-717. https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fremineo.org%2Frepositorio%2Frao%2Faonc%2Faoe2016.pdf&psig=AOvVaw2vVXhP11jCxpW67Ueur2C&ust=1758908637978000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBUQjhxqFwoTCOj0k7m79I8DFQAAAAAdAAAAABAE

Kotler, P., y Armstrong, G. (2007). *Marketing, Versión para Latinoamérica*. Pearson.

Kotler, P., y Keller, K. (2012). *Dirección de marketing*. Pearson.

Ley para el Desarrollo de la Competitividad de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa [Ley PyME] Reformado, Diario Oficial de la Federación [D.O.F], 20 de octubre de 2023 (México). https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LDCMPME.pdf

Lozana, M. (2017). *Estrategia de precio*. Fundación Universitaria del Área Andina.

Maldonado-Mina, J. L. (2025). El papel de las microempresas rurales en el fortalecimiento del desarrollo rural: una mirada desde el contexto ecuatoriano. *Código científico*, *6*(1), 341-353. https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v6/n1/894

Monares, P., Monares, A., y Bustamante, W. (2001). *Gestión de nuevos negocios para la microempresa rural*. Programa de Apoyo a la Microempresa Rural.

Merino, M., Quimis, L., Quimis, L., y Parrales, R. (2022). Estrategias Competitivas para el Desarrollo Microempresarial: Caso Asociación de comerciantes "Mario Falconí Yépez". *Revista Científica de la Investigación y el conocimiento*, *6*(3), 376-392. 10.26820/recimundo/6. (3). junio.2022.376-392

Navas. G., Peña. D., Silva. N., y Mayorga. M. (2021). Costos de producción y la determinación de precios del chocolate de la asociación "las delicias del triunfo". *Revistas dilemas contemporáneas, 114*, 1-28. https://doi.org/10.46377/dilemas.v9i.3027

Organización Internacional del Trabajo. (2019, 10 de octubre). *La mayor parte del empleo mundial procede de las pequeñas empresas y los trabajadores independientes, concluye un nuevo informe de la OIT.* https://www.ilo.org/es/resource/news/la-mayor-partedel-empleo-mundial-procede-de-las-peque%C3%B1asempresas-y-los

Organización Internacional del Trabajo. (2023, 27 de junio). *La MYPIME, columna vertebral de las economías y del mundo del trabajo.* https://www.ilo.org/es/resource/lasmipyme-columna-vertebral-de-las-economias-y-delmundo-del-trabajo

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. (2024, 4 de julio). *Índice de Políticas para PyMEs: América Latina y el Caribe 2024.* https://www.oecd.org/es/publications/indice-depoliticas-para-pymes-america-latina-y-el-caribe-2024_807e9eaf-es.html

Rodríguez, B. (2015). Política de fijación de precios: una nueva metodología basada en la estructura de costoscompetencia de la empresa. *Revista Internacional Administración y Finanzas, 8*(2), 121-128. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2500527

Sánchez, J. (2025, 29 de julio). PyMEs en México: Estadísticas y datos [SMEs in Mexico- Statistics & Facts]. Statista. https://www.statista.com/topics/13573/smes-inmexico.com

Tello, D., y Tello, L. (2015). Capacitación en área rural que es básica para una productividad beneficiosa. *Anuales Científicos, 76*(2), 241-248. DOI: http://dx.doi.org/10.21704/ac.v76i2.787

Terán, G., y García, P. (2020). Estrategias para el incremento de ventas: caso de estudio microempresa Mundo de ensueño. *Enfoques,* 16(4), 248-260. https://www.revistaenfoques.org/index.php/revistaenfoques/article/view/97/785

Torres, C., y Silva, C. (2024). Métodos de fijación de precios en la editorial Tajamar en el año 2024. [Trabajo de grado, Universidad de la Costa]. *Repositorio institucional CUC.* https://repositorio.cuc.edu.co/server/api/core/bitstreams/ b3e94c8e-b2ce-4d6d-bdda-b459ad71de45/content

World Economic Forum. (2022, 01 de diciembre). *Pequeñas empresas, grandes problemas: un nuevo informe afirma que el 67% de las pymes a nivel mundial luchan por sobrevivir* [Small Business, Big Problem: New Report Says 67% of SMEs Worldwide Are Fighting for Survival]. https://www.weforum.org/press/2022/12/smallbusiness-big-problem-new-report-says-67-of-smesworldwide-are-fighting-for-survival.com

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Sustainable development: an analysis of global initiatives for access to STEM education in developing countries

Arellano-Becerril, Enrique

**Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana, B.C, México; (e-mail: enrique.arellano@uabc.edu.mx).*

Abstract: Access to higher education in developing countries continues to be a structural challenge that limits opportunities for technical and vocational training, especially in strategic areas such as science, technology, engineering, mathematics (STEM), and information and communication technologies (ICT). The objective of this study is to identify and analyze global educational support and financing initiatives that contribute to the achievement of target 4.b of Sustainable Development Goal 4 (SDG 4), which focuses on increasing scholarships for students from developing countries. The methodology employed was a systematic documentary and bibliometric review, guided by the PRISMA protocol, based on academic sources. Relevant studies and programs were identified, including scholarships from UNESCO, AFS Global STEM Academies, DAAD, MPOWER Financing, and the British Council. The results demonstrate a range of programs focused on STEM and digital skills training, with inclusive and sustainable approaches. However, challenges persist in terms of coverage, coordination with national policies, and impact assessment. It is concluded that strengthening these initiatives, along with greater international cooperation and integrated public policies, is key to ensuring quality education and reducing access gaps in vulnerable contexts.

Keywords: SDG 4, Education, Scholarships, STEM, ICT

1. INTRODUCCION

En 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, un ambicioso plan de acción global que establece 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y 169 metas específicas, con el propósito de erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad para todos hacia el año 2030 (ONU, 2019). Esta agenda representa un compromiso colectivo de los Estados Miembros para enfrentar los desafíos más apremiantes de la humanidad, promoviendo un desarrollo equilibrado en sus dimensiones económica, social y ambiental (Camarán et al., 2019).

Los ODS son universales, integradores e interdependientes, lo que implica que su cumplimiento requiere de la colaboración entre gobiernos, sociedad civil, sector privado y academia. Hoy en día, las universidades son responsables de promover y avanzar los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible incluidos en la Agenda 2030 (Aversano, 2026). En este contexto, la educación, la innovación tecnológica, la equidad de género y la sostenibilidad ambiental se posicionan como pilares fundamentales para lograr un desarrollo inclusivo y resiliente (PNUD, 2024). La implementación efectiva de los ODS demanda no solo recursos financieros, sino también conocimiento científico, voluntad política y participación ciudadana activa.

La investigación académica desempeña un papel clave en este proceso, al generar evidencia, evaluar políticas públicas y proponer soluciones innovadoras. La innovación es un nodo central que vincula las soluciones tecnológicas y organizacionales con los marcos de sostenibilidad (Vera et al., 2025). Este artículo se enmarca en dicho esfuerzo, abordando una de las metas del ODS 4, centrada en ampliar el acceso a oportunidades educativas para estudiantes de países en desarrollo, especialmente en programas de formación técnica, científica y tecnológica, como estrategia para reducir desigualdades y fortalecer las capacidades locales.

El Objetivo de Desarrollo Sostenible 4 (ODS 4) busca garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad, y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos. Este objetivo reconoce que la educación es un derecho humano fundamental y un motor esencial para el desarrollo sostenible, la reducción de desigualdades y la promoción de sociedades más justas (Pacto Mundial ONU, 2025). Sin embargo, a pesar de los avances logrados, persisten importantes desafíos, especialmente en los países menos

adelantados, donde millones de personas aún carecen de acceso a una educación de calidad.

Una de las metas clave del ODS 4 (meta 4.b) establece la necesidad de aumentar sustancialmente el número de becas disponibles para estudiantes de países en desarrollo, con el fin de facilitar su acceso a programas de enseñanza superior, incluidos programas técnicos, científicos, de ingeniería y de tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Esta meta responde a la creciente demanda de competencias especializadas en un mundo cada vez más digitalizado y globalizado, donde la educación superior se convierte en un factor determinante para la movilidad social y el desarrollo económico. Una de las metas clave del ODS 4 (meta 4.b) establece la necesidad de aumentar sustancialmente el número de becas disponibles para estudiantes de países en desarrollo, con el fin de facilitar su acceso a programas de enseñanza superior, incluidos programas técnicos, científicos, de ingeniería y de tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Esta meta responde a la creciente demanda de competencias especializadas en un mundo cada vez más digitalizado y globalizado, donde la educación superior se convierte en un factor determinante para la movilidad social y el desarrollo económico. Un número creciente de investigaciones empíricas muestra que la inversión en educación en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) genera beneficios económicos y de desarrollo mensurables (Sarpong & Wube, 2025).

No obstante, los estudiantes de regiones con menores niveles de desarrollo enfrentan múltiples barreras estructurales: limitaciones económicas, falta de infraestructura educativa, escasa oferta académica pertinente y brechas digitales. Ampliar el acceso a becas y programas de formación superior no solo representa una cuestión de equidad, sino también una estrategia clave para empoderar a las comunidades, fortalecer el capital humano y fomentar la innovación local. Este artículo analiza el papel de las becas internacionales como instrumento de justicia educativa y propone recomendaciones para mejorar su alcance e impacto en los países en desarrollo. La educación STEM es vital para la prosperidad global a largo plazo (Deehan et al., 2025)

1.1. Planteamiento del problema

A pesar de los compromisos internacionales asumidos en el marco de la Agenda 2030, millones de jóvenes en países en desarrollo, y especialmente en los países menos adelantados, continúan enfrentando barreras estructurales que limitan su acceso a la educación superior. La falta de recursos económicos, la escasa oferta de programas pertinentes, la débil infraestructura tecnológica y la limitada disponibilidad de becas y apoyos financieros, perpetúan ciclos de desigualdad y exclusión educativa. Esta situación es particularmente crítica en áreas estratégicas como la ciencia, la tecnología, la ingeniería y las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), donde la demanda global de talento calificado crece de forma acelerada. La ingeniería es a menudo como una fuerza impulsora del progreso y la innovación.(Gebeshuber & Doyle-Kent, 2024). Otro desafio es que la participación de las mujeres en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) sigue estando significativamente por debajo de la de los hombres en la mayoría de los países (Clemons, 2025)

La insuficiencia de mecanismos de financiamiento y cooperación internacional limita las posibilidades de formación avanzada para estudiantes con alto potencial académico, afectando no solo su desarrollo personal, sino también la capacidad de innovación y crecimiento sostenible de sus comunidades. En este contexto, resulta urgente analizar y fortalecer las iniciativas globales de apoyo educativo que permitan ampliar el acceso equitativo a la educación superior como vía para cumplir con la meta 4.b del ODS 4.

1.2 Objetivos del estudio

Objetivo general:

Analizar estrategias de fortalecimiento para las iniciativas globales de apoyo educativo y financiamiento dirigidas a estudiantes de países en desarrollo, con el fin de ampliar su acceso a programas de enseñanza superior en áreas técnicas, científicas, de ingeniería y TIC, en el marco de la meta 4.b del ODS 4.

Objetivos específicos:

Identificar las principales iniciativas internacionales de becas y financiamiento educativo orientadas a estudiantes de países en desarrollo.

Contribuir al debate académico sobre el papel de la educación superior como motor del desarrollo sostenible en contextos de vulnerabilidad.

A continuación, se enlistan algunos de los programas de formación profesional y técnica en áreas científicas, tecnológicas, de ingeniería y TIC con mayor demanda a nivel mundial (Tabla 1).

Tabla 1. Programas de formación profesional y técnica en áreas científicas, tecnológicas, de ingeniería y TIC con alta demanda a nivel mundial

Programa	Perfil
1. Ciberseguridad y Seguridad de la Información	- Perfil: Técnicos en protección de redes, análisis de vulnerabilidades, respuesta a incidentes. -Nivel: Técnico superior, certificaciones profesionales (CompTIA, CISSP, CEH).
2. Desarrollo de Software y Programación	Perfil: Programadores, desarrolladores web y móviles, testers de calidad (QA). - Lenguajes clave: Python, JavaScript, Java, SQL.
3. Análisis de Datos y Big Data	- Perfil: Técnicos en análisis de datos, visualización, minería de datos. - Herramientas comunes: Excel avanzado, Power BI, SQL, R, Python.

4. Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático	- Perfil: Técnicos en IA aplicada, asistentes de investigación, operadores de sistemas inteligentes. - Ámbitos: Industria 4.0, salud digital, servicios financieros, ciudades inteligentes.
5. Robótica y Automatización Industrial	- Perfil: Técnicos en mecatrónica, mantenimiento de robots, integración de sistemas automatizados. - Sectores: Manufactura, automotriz, logística, agricultura de precisión.
6. Ingeniería en Energías Renovables	- Perfil: Técnicos en instalación y mantenimiento de sistemas solares, eólicos y térmicos. - Demanda: Alta en países con transición energética y políticas de sostenibilidad
7. Diseño y Manufactura Digital (Impresión 3D, CAD/CAM)	- Perfil: Técnicos en diseño asistido por computadora, prototipado rápido, fabricación aditiva. - Aplicación: Industria, salud, arquitectura, educación técnica.
8. Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC)	- Perfil: Soporte técnico, redes, telecomunicaciones, cloud computing. - Certificaciones clave: Cisco (CCNA), Microsoft, AWS, Google Cloud.
9. Diseño de Productos Sostenibles	- Perfil: Técnicos en diseño industrial con enfoque ecológico, materiales reciclables, eficiencia energética. - Tendencia: Alta demanda por innovación verde y economía circular
10. Mantenimiento de Sistemas Electrónicos y Automatizados	- Perfil: Técnicos en electrónica, sensores, PLCs, sistemas embebidos. - Sectores: Transporte, energía, manufactura, salud.

2. METODOLOGIA

Este estudio se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de tipo exploratorio, sustentado en dos estrategias metodológicas complementarias: la revisión documental y la revisión bibliométrica sistemática, con el objetivo de identificar, analizar y sintetizar las principales iniciativas globales de apoyo educativo y financiamiento dirigidas a estudiantes de países en desarrollo, en el marco de la meta 4.b del ODS 4.

2.1 Revisión documental

La revisión documental consistió en el análisis de fuentes primarias y secundarias provenientes de organismos internacionales (UNESCO, ONU, Banco Mundial, OEA, AMEXCID, OEI, entre otros), así como informes técnicos, políticas públicas, bases de datos institucionales y literatura académica relacionada con programas de becas, movilidad académica y cooperación internacional en educación superior. Esta revisión permitió contextualizar el problema, identificar buenas prácticas y establecer criterios de análisis comparativo entre las distintas iniciativas.

Revisión bibliométrica con método PRISMA

La revisión bibliométrica se realizó siguiendo el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que garantiza la transparencia, exhaustividad y reproducibilidad del proceso de revisión sistemática. Se utilizaron bases de datos académicas como EBSCO y Elsevier, aplicando criterios de inclusión como:

Publicaciones entre 2015 y 2025.

Idiomas: español e inglés.

Palabras clave: "ODS 4", "educación superior", "becas internacionales", "países en desarrollo", "formación técnica y profesional", "PRISMA review education".

El proceso incluyó cuatro fases: identificación, cribado, elegibilidad e inclusión. Se utilizó un diagrama de flujo PRISMA para documentar el número de registros identificados, seleccionados y excluidos, así como las razones de exclusión. Los artículos seleccionados fueron analizados mediante técnicas de análisis de contenido y categorización temática, lo que permitió identificar tendencias, vacíos de investigación y enfoques predominantes en la literatura.

Esta metodología permitió construir un marco analítico robusto para evaluar el impacto de las iniciativas existentes y formular recomendaciones de política pública orientadas a fortalecer el acceso equitativo a la educación superior en contextos de vulnerabilidad.

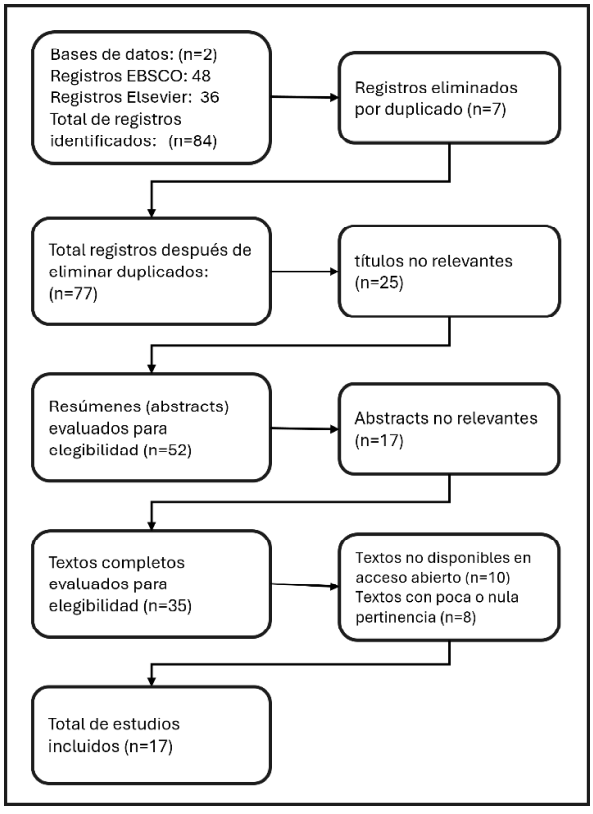


Figura 1. Método PRISMA

Este diagrama (Figura 1) ilustra las cuatro fases del método PRISMA:

Identificación: Se localizaron 84 registros en bases de datos académicas.

Cribado: Tras eliminar duplicados, se examinaron 77 registros, de los cuales 25 fueron excluidos por no cumplir con los criterios de inclusión.

Elegibilidad: Se evaluaron 35 artículos en texto completo, excluyendo 18 por falta de pertinencia o calidad metodológica.

Inclusión: Finalmente, se incluyeron 17 estudios.

4. RESULTADOS

Marco de análisis y propuestas de política pública: iniciativas globales para el acceso equitativo a la educación superior

El cumplimiento de la meta 4.b del Objetivo de Desarrollo Sostenible 4 (ODS 4), que busca aumentar sustancialmente las oportunidades de becas para estudiantes de países en desarrollo, requiere de políticas públicas integrales y de la articulación de esfuerzos multilaterales. Diversas iniciativas internacionales han demostrado ser instrumentos efectivos para reducir las barreras estructurales que enfrentan los estudiantes de contextos vulnerables al acceder a programas de enseñanza superior, particularmente en áreas técnicas, científicas y tecnológicas.

Entre estas iniciativas destaca el Programa de Becas de la UNESCO, que en colaboración con gobiernos como China, Polonia y Japón, ofrece oportunidades de formación en ingeniería, TIC y ciencias aplicadas (Berkovski & Gottschalk, 1997). Estas becas no solo promueven la movilidad académica, sino que también fortalecen las capacidades locales mediante la transferencia de conocimiento y tecnología (UNESCO, 2024).

Asimismo, la Organización de Estados Americanos (OEA) ha consolidado un programa de becas que prioriza la formación de capital humano en áreas estratégicas para el desarrollo regional, como la ingeniería, la educación y la innovación tecnológica. Este enfoque regional permite adaptar las ofertas educativas a las necesidades específicas de los países miembros.

El Banco Mundial, por su parte, ha financiado proyectos educativos en más de 90 países, con énfasis en el fortalecimiento de la educación técnica y profesional. Sus programas promueven la equidad en el acceso a la educación superior mediante inversiones en infraestructura, conectividad digital y formación docente.

En el ámbito latinoamericano, la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID) y la Organización de Estados Iberoamericanos (OEI) han impulsado programas de movilidad académica y becas de posgrado que permiten a estudiantes de la región acceder a formación avanzada en áreas de alta demanda.

Estas iniciativas constituyen referentes clave para el diseño de políticas públicas que busquen ampliar el acceso a la educación superior en países en desarrollo. Su replicabilidad y escalabilidad dependen, sin embargo, de una mayor inversión pública y privada, así como de marcos normativos que garanticen la sostenibilidad y equidad de estos programas. En este sentido, se propone fortalecer los mecanismos de cooperación internacional, fomentar alianzas entre universidades y organismos multilaterales, y establecer sistemas de seguimiento y evaluación que aseguren el impacto de las becas en el desarrollo de capacidades locales.

Tabla 2. Programas de iniciativas globales para el apoyo y financiamiento para estudiantes de países en desarrollo para formación en áreas STEM

Programa	Alcance
1. AFS Global STEM Academies (con apoyo de BP) (AFS, 2025)	Dirigido a: Jóvenes de 15 a 17 años y medio. Áreas: STEM y sostenibilidad. Enfoque: Desarrollo de competencias globales, innovación social y liderazgo juvenil.
2. Academias STEM – AFS México y BP	Dirigido a: Estudiantes de nivel medio superior en México. Áreas: Ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas. Enfoque: Educación STEM, sostenibilidad y competencias interculturales.
3. UNESCO Fellowships Programme (UNESCO, 2025)	Dirigido a: Estudiantes e investigadores de países en desarrollo. Áreas: Ciencias naturales, ingeniería, TIC, educación, cultura.
4. DAAD – Becas para Maestrías en Áreas STEM	Dirigido a: Estudiantes de Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Áreas: Ciencias, ingeniería, informática, matemáticas. Cobertura: Financiamiento completo para estudios de maestría en Alemania
5. MPOWER Financing – Becas STEM para estudiantes internacionales	Dirigido a: Estudiantes internacionales en programas STEM. Áreas: Ciencia, tecnología, ingeniería, matemáticas.
6. British Council – Becas Mujeres en STEM	Dirigido a: Mujeres de países en desarrollo.

	Áreas: STEM. Objetivo: Reducir la brecha de género en ciencia y tecnología

Algunas medidas de política y cooperación internacional son las siguientes:

El Grupo de Trabajo Interinstitucional de las Naciones Unidas sobre la Financiación para el Desarrollo destaca la necesidad de alianzas entre múltiples actores y la cooperación Sur-Sur para apoyar la CTI (Ciencia, Tecnología e Innovación) en los países en desarrollo (United Nations, 2020).

El Banco Mundial, la UNESCO y la OCDE desempeñan funciones superpuestas pero distintas en la gobernanza de la educación STEM (Elfert & Ydesen, 2023).

Las iniciativas JJ/WBGSP y STEM para el Desarrollo del Banco Mundial demuestran el valor de la mentoría, la integración de la investigación y el fortalecimiento de capacidades a largo plazo (World Bank Group, 2025).

6. DISCUSION

Los resultados anteriores nos llevan a cuestionarnos ¿Por qué están fragmentados los programas de becas enfocados a STEM?. Dentro de algunas posibles razones se considera los siguientes puntos:

Falta de coordinación: Diversos actores (gobiernos, ONG, sector privado) operan de forma aislada.

Criterios de elegibilidad variables: Los requisitos inconsistentes entre los programas generan confusión y obstáculos.

Difusión limitada: Muchos estudiantes desconocen las oportunidades disponibles debido a la escasa difusión.

Enfoque a corto plazo: Algunos programas son piloto o carecen de financiación sostenible.

Sesgos de género y regionales: Los programas pueden favorecer involuntariamente a solicitantes urbanos o masculinos.

Y como propuestas se también se han contemplado estrategias para superar la fragmentación, como las siguientes:

Registro mundial de becas: Una plataforma centralizada y multilingüe que reúne todas las becas relacionadas con STEM para países en desarrollo. Incluye filtros por edad, género, región y campo de estudio.

Alianzas público-privadas (APP): Fomentar la colaboración entre gobiernos, empresas tecnológicas e instituciones educativas para aunar recursos y alinear objetivos.

Marco de solicitud estandarizado: Desarrollar un proceso de solicitud unificado para reducir la carga administrativa y mejorar el acceso.

Extensión comunitaria: Colaborar con escuelas locales, ONG y líderes comunitarios para sensibilizar y apoyar las solicitudes.

Sistemas de Monitoreo y Evaluación: Implementar un seguimiento riguroso de los resultados de las becas para fundamentar las políticas y mejorar el diseño de los programas.

7. CONCLUSIONES

La revisión documental y bibliométrica permitió identificar un total de 17 estudios relevantes que abordan iniciativas de apoyo educativo y financiamiento para estudiantes de países en desarrollo, en el marco de la meta 4.b del ODS 4. Las publicaciones analizadas provienen principalmente de organismos multilaterales, universidades, centros de investigación y revistas científicas indexadas en bases como EBSCO y Elsevier.

Los resultados muestran que las iniciativas más destacadas a nivel global incluyen programas de becas promovidos por la UNESCO, la OEA, el Banco Mundial, AMEXCID y la OEI. Estas iniciativas se concentran en áreas estratégicas como la ingeniería, las ciencias aplicadas, la formación técnica y profesional, y las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Se identificó que la mayoría de los programas priorizan a estudiantes de países de ingresos bajos y medios, con criterios de selección basados en mérito académico, necesidad económica y compromiso con el desarrollo comunitario.

Desde el análisis bibliométrico, se observó un aumento sostenido en la producción científica relacionada con el ODS 4 y la educación superior entre 2015 y 2025, con un énfasis creciente en la equidad, la inclusión y la cooperación internacional. Las palabras clave más frecuentes fueron equidad educativa, movilidad académica, becas internacionales y formación técnica. Asimismo, se identificaron vacíos en la literatura respecto a la evaluación de impacto a largo plazo de estas iniciativas en los contextos locales.

Los hallazgos de este estudio evidencian que, si bien existen múltiples esfuerzos internacionales para ampliar el acceso a la educación superior en países en desarrollo, persisten desafíos significativos en términos de cobertura, sostenibilidad y pertinencia. Las iniciativas analizadas han demostrado ser efectivas en la creación de oportunidades educativas, pero su alcance sigue siendo limitado frente a la magnitud de la demanda global.

Uno de los principales retos identificados es la fragmentación de los programas de becas, que dificulta su articulación con las políticas educativas nacionales y limita su impacto estructural. Además, la falta de seguimiento sistemático y de mecanismos de evaluación impide medir con precisión los efectos de estas iniciativas en el desarrollo de capacidades locales y en la reducción de desigualdades.

En este sentido, se propone avanzar hacia modelos de cooperación internacional más integrados, que vinculen a gobiernos, universidades, organismos multilaterales y sector privado en el diseño de programas de becas alineados con las

necesidades del desarrollo sostenible. Asimismo, se recomienda fortalecer los sistemas de información y evaluación, promover la equidad de género en el acceso a las becas, y garantizar la inclusión de estudiantes de comunidades rurales, indígenas y marginadas.

Finalmente, se destaca la necesidad de que los países en desarrollo no solo sean receptores de ayuda, sino también actores activos en la construcción de alianzas educativas, promoviendo políticas públicas que reconozcan la educación superior como un derecho y una herramienta estratégica para el desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) del Gobierno de México, a través de la beca del Sistema Nacional de Investigadores (SNII), y con fondos provenientes de los programas prioritarios. El contenido de esta publicación es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja necesariamente la postura oficial de las instituciones financiadoras.

REFERENCIAS

AFS. (2025). *AFS Global STEM Academies*. AFS Intercultural Programs.

Aversano, N. (2026). Sustainable Development Goals and Universities: Actions and Disclosure. En V. Ratten (Ed.), *International Encyclopedia of Business Management (First Edition)* (pp. 103–108). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13701-3.00224-3

Berkovski, B., & Gottschalk, C. M. (1997). Strengthening human resources for new and renewable energy technologies of the 21st century: UNESCO Engineering Education and Training Programme. *Renewable Energy*, *10*(2), 441–450. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)00103-6

Camarán, M. L., Barón M., L., & Rueda S., M. P. (2019). La Responsabilidad social empresarial y los objetivos del desarrollo sostenible (ODS). *Teorías, Enfoques y Aplicaciones en las Ciencias Sociales*, *11*(24), 41–52. https://revistas.uclave.org/index.php/teacs/article/view/2206

Clemons, A. (2025). Navigating a house with many rooms: A discipline-based approach to assessing digital scholarship. *The Journal of Academic Librarianship*, *51*(5), 103121. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.acalib.2025.103121

Deehan, J., Redshaw, S., Danaia, L., Postlethwaite, F., Donnelly, A., & Morris, C. (2025). Understanding STEM beyond the cities: A comprehensive review of non-metropolitan STEM education research. *International Journal of Educational Research Open*, *9*, 100496. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijedro.2025.100496

Elfert, M., & Ydesen, C. (2023). UNESCO, the OECD and the World Bank: A Global Governance Perspective. En M. Elfert & C. Ydesen (Eds.), *Global Governance of Education: The Historical and Contemporary Entanglements of UNESCO, the OECD and the World Bank* (pp. 23–50). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40411-5_2

Gebeshuber, I. C., & Doyle-Kent, M. (2024). Innovations and Challenges in Engineering Education for the Future: Contributing to the UN Sustainable Development Goals (SDGs). *IFAC-PapersOnLine*, *58*(3), 134–138. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.139

Sarpong, J., & Wube, B. A. (2025). Empowering STEM education from within: A call for self-reliance in the Global South. *International Journal of Educational Development*, *117*, 103350. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijedudev.2025.103350

UNESCO. (2024). *Reunión Mundial sobre la Educación 2024*.

UNESCO. (2025). *UNESCO Fellowships*.

United Nations. (2020). *International level institutions and mechanisms to strengthen science, technology and innovation*. Department of Economic and Social Affairs Financing for Sustainable Development.

Vera, C. L., Gandía, J. A. G., de Lucas Ancillo, A., & del Val Núñez, M. T. (2025). Innovation and circular economy within the sustainable development goals: A bibliometric and conceptual analysis. *Global Economics Research*, *1*(2), 100011. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecores.2025.100011

World Bank Group. (2025). *World Bank Scholarships Program*. World Bank Scholarships.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Management and Monitoring of Ardea Herodias in the Southern Zone of Tamaulipas

Alarcón-Ruiz, Erika*. Leal Saldaña, Liliana*. Martínez Flores, Hilario Rafael*. Garza Morales, Elsa María*. Torres Mariño, Nora Armenia*. Ordóñez Pacheco, Luis Daniel*.

**Tecnológico Nacional de México, I.T. Cd. Madero. Ave 1° de mayo s/n Col. Los Mangos, CP 89440 Ciudad Madero, Tamaulipas, México; (*Tel:833-357-48-20*: e-mail:* erika.ar@cdmadero.tecnm.mx

Abstract: The Great Gray Heron (Ardea herodias) is a ciconiiform species belonging to the Ardeidae family. In the southern region of the state of Tamaulipas, there is no information on this particular species, although its presence is associated with other birds such as gulls, eagles, hawks, pelicans, wading birds, ducks, and other species protected under NOM-059-SEMARNAT-2010. This study presents the sighting, distribution, feeding, roosting, possible breeding and nesting areas of the Great Gray Heron (Ardea herodias) in specific areas of the southern region of the state of Tamaulipas and Laguna de Pueblo Viejo, Veracruz.

Keywords: Great Gray Heron, Monitoring, Maps, Geospatial Analysis

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la problemática presentada por el cambio climático a nivel mundial ha afectado en forma directa la presencia de muchos organismos en su hábitat natural, es por esto que existe una gran preocupación en países como el nuestro para la conservación de organismos, sobre todo aquellos que están expuestos y mencionados en la NOM-059SEMARNAT-2010. Esta preocupación se refleja claramente en los marcos y directrices como el protocolo de Kyoto así como el documento de Mecanismos para un Desarrollo Limpio. Éstos se encuentran relacionados con la permanencia de los organismos en su hábitat, considerándose a las aves como especies indicadoras de la conservación del mismo. Las aves están ampliamente distribuidas por todo el mundo desde los Polos hasta el Ecuador, y desde los océanos hasta la cima de las montañas, encontrándose en hábitats tan diversos tales como el desierto, bosques, sabanas, tundras y ciudades. Dentro de esta diversidad de organismos, las aves acuáticas conforman un especial grupo de importancia en el bienestar y conservación de los ecosistemas acuáticos. La garza gris (Ardea herodias) es una especie de tipo ciconiforme perteneciente a la familia Ardeidae. Se le considera una especie común en algunas regiones de los Estados Unidos de Norteamérica, y escasa en algunas zonas de la República Mexicana, llegando inclusive su presencia hasta las islas Galápagos. Una de sus características más importantes es su talla, ya que sobresale de las especies de aves acuáticas que habitan las zonas costeras y ribereñas. En nuestro país es habitante, al igual que las garzas de cuerpos de agua principalmente salobres, aunque se ha reportado su presencia en lagos y lagunas como organismos indicadores del estado de los ecosistemas antes mencionados (De la Cruz-Rock y Tello-Iturbe, 2012).

En la Zona Sur del estado de Tamaulipas no existe información sistematizada o publicada sobre la ecología, comportamiento o dinámica poblacional de Ardea herodias (garza gris). La ausencia de registros específicos dificulta establecer patrones claros sobre su distribución, estacionalidad o estado de conservación en la región. Sin embargo, su presencia se ha asociado con comunidades de aves acuáticas y costeras como gaviotas (Larus spp.), pelícanos (Pelecanus occidentalis), garzas blancas (Egretta thula), patos silvestres (Anas spp.), halcones (Falco spp.) y diversas especies zancudas que comparten los mismos hábitats de humedal, estuarios y cuerpos de agua interiores.

De acuerdo con el marco teórico de la ecología de humedales (Mitsch & Gosselink, 2015), estos ecosistemas proveen funciones ecológicas clave, tales como la regulación hídrica, el almacenamiento de nutrientes y la provisión de alimento para aves residentes y migratorias. Las aves acuáticas actúan como bioindicadores de la calidad ambiental, ya que su presencia y abundancia reflejan el estado ecológico de los cuerpos de agua (Wetlands International, 2021). En este sentido, la observación de A. herodias junto con otras especies sugiere que los humedales del sur de Tamaulipas mantienen aún condiciones favorables para la alimentación y refugio de fauna silvestre, a pesar de las presiones urbanas e industriales que enfrenta la zona.

Asimismo, varias de las especies con las que se ha registrado su coexistencia están protegidas bajo la NOM-059-SEMARNAT-2010, normativa mexicana que establece categorías de riesgo y lineamientos para la conservación de especies silvestres nativas. Esta relación ecológica refuerza la importancia de conservar los hábitats asociados a la garza gris, ya que la pérdida o alteración de estos ecosistemas puede

afectar a un conjunto amplio de aves que cumplen funciones ecológicas esenciales, como el control de poblaciones de peces e insectos, la dispersión de semillas y el reciclaje de nutrientes (SEMARNAT, 2010).

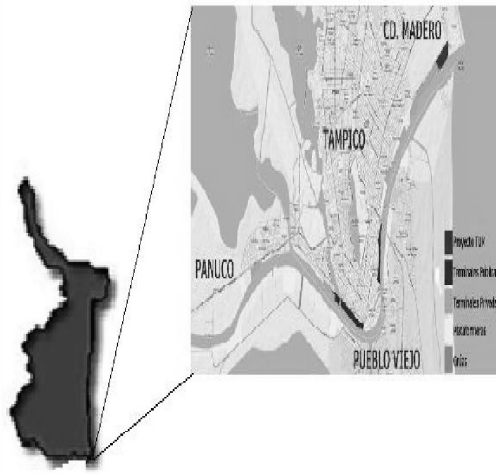


Figura 1. Localización.

Por tanto, se resalta la necesidad de promover investigaciones ornitológicas regionales que documenten con mayor precisión la composición de especies, abundancia relativa, rutas migratorias y factores ambientales que influyen en su permanencia. Esta información permitirá diseñar estrategias locales de conservación, articuladas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 14 y 15) y con las políticas nacionales de manejo sustentable de humedales y biodiversidad.

En este trabajo se presenta la caracterización, el avistamiento, distribución, sitios de alimentación, pernocta, cortejo/apareamiento y nidación de *Ardea herodias* en humedales costeros y lagunares de la región, integrando variables ecológicas, hidrometeorológicas y de uso humano, para orientar acciones de conservación participativa y gestión territorial.

2. ZONA DE ESTUDIO

Considerando que la Zona Sur del estado de Tamaulipas abarca una gran cantidad de hábitats que son ocupados por aves de diferente tipo incluyendo la garza gris, es por esto que se dividió la zona en las siguientes áreas de estudio que conforman la micro localización de la zona de estudio (Fig 2)

Zona 1. Laguna del Chairel

Cuerpo de agua dulce localizado en Tampico, Tamaulipas, principal fuente de abastecimiento para la región sur del estado. Rodeada por áreas urbanas y vegetación ribereña, presenta hábitats de humedal que albergan aves acuáticas y especies nativas.

Zona 2. Laguna de Pueblo Viejo “Islotes”

Sector conformado por pequeños islotes ubicados dentro de la laguna, en el norte de Veracruz. Son zonas de difícil acceso, con vegetación emergente y arbustiva que sirve de refugio y anidación para aves acuáticas, garzas y otras especies silvestres.

Zona 3. Laguna de Pueblo Viejo “Márgenes”

Corresponde a los bordes de la laguna, donde se mezclan áreas de manglar, pastizales y asentamientos humanos dispersos. Presenta actividad pesquera y agrícola, así como alta interacción entre el entorno natural y las comunidades locales.

Zona 4. Río Pánuco margen derecha

Ubicada del lado de Tamaulipas, esta margen combina zonas portuarias, industriales y residenciales. Es un corredor fluvial con tráfico marítimo y áreas ribereñas alteradas, aunque aún se observan sectores con vegetación secundaria y fauna adaptada.

Zona 5. Río Pánuco margen izquierda

Pertenece al estado de Veracruz y conserva áreas más naturales con vegetación de ribera, humedales y pequeños embarcaderos. Su función ecológica es clave para el flujo de nutrientes y como zona de paso de aves migratorias.

Zona 6. Laguna del Carpintero

Laguna urbana enclavada en el centro de Tampico, rodeada de parques y áreas recreativas. Aunque presenta impactos por urbanización, mantiene importancia ecológica al ser hábitat de cocodrilos, aves acuáticas y peces locales.

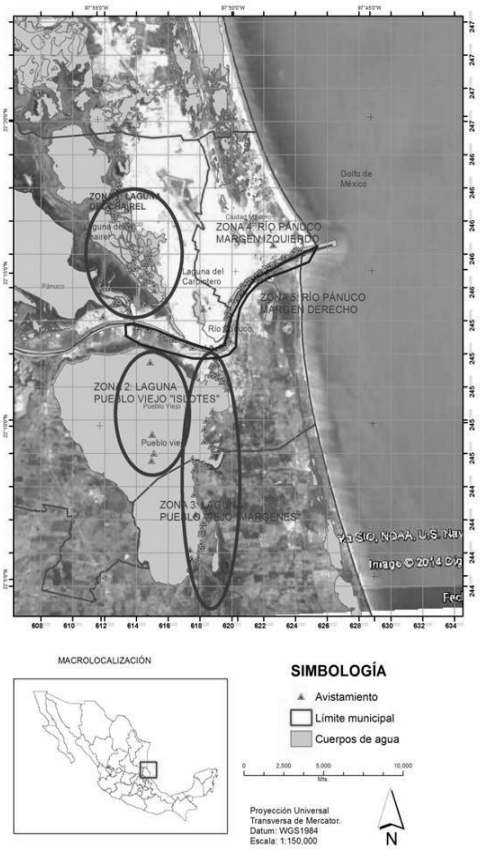


Figura 2. Micro localización

3. SISTEMÁTICA DE LA ESPECIE ARDEA HERODIAS

Se presenta la clasificación taxonómica de la *Ardea herodias* de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 1. Clasificación taxonómica *Ardea herodias*.

REINO	Animalia
FYLUM	Chordata
CLASE	Aves
ORDEN	Ciconiiformes
FAMILIA	Ardeidae
GENERO	Ardea
ESPECIE	herodias

3.1 Comportamiento

Pueden ser gregarias (Figura 3) pero si las condiciones locales de alimentación lo favorecen, pueden forrajear individualmente o en grupos mixtos con ibises (*Eudocimus sp*.), espátulas rosadas (*Platalea sp.*) y otras aves. En general se ha reconocido que las garzas blancas actúan como núcleo en la formación de grupos mixtos. Las garzas blancas (*Ardea sp.)* son por lo general gregarias y se alimentan en áreas abiertas. Las garzas morenas (*Ardea sp.*) forrajean de día en dos picos de actividad temprano en la mañana y en la tarde, pero también en la noche para aprovechar los ambientes afectados por la marea. (Martínez Villalta y Motis, 1992). Las vocalizaciones son silenciosas excepto en las colonias reproductivas o cuando se les espanta en los sitios de forrajeo. Las llamadas muestran mucha variabilidad. También tienen sonidos no vocales como el aplaudir los picos (Butler, 1992).

Figura 3. Garza gris (*Ardea herodias).*
Fuente: archivo fotográfico del autor.

3.2 *Distribución*

Las garzas pertenecen al orden Pelecaniformes y a la familia Ardeidae, grupo que comprende alrededor de 64 especies distribuidas ampliamente en regiones templadas y tropicales del mundo (Martínez-Villalta y Motis, 1992; Kushlan & Hancock, 2005). Son aves acuáticas de hábitos predominantemente costeros o de humedales interiores, caracterizadas por su morfología adaptada a la caza en aguas someras: patas largas, cuello flexible y pico afilado, que les permite capturar peces, anfibios, crustáceos e insectos acuáticos. A diferencia de otras aves acuáticas, las garzas son no nadadoras, pues dependen de la inmovilidad y la precisión para alimentarse, desplazándose por las orillas de cuerpos de agua, marismas, ríos, lagos y planicies inundables.

De acuerdo con estudios de distribución geográfica, Ardea herodias (garza gris o garza morena) presenta una amplia distribución en el continente americano, reproduciéndose desde Alaska y Canadá hasta Centroamérica y el Caribe. En México, la especie se reproduce localmente desde el nivel del mar hasta aproximadamente los 2000 metros de altitud, especialmente en zonas costeras con alta disponibilidad de alimento y vegetación ribereña. Se han registrado colonias reproductivas en las costas del Noroeste (Baja California Sur, Sonora y Sinaloa) y en el Golfo de México, desde Tamaulipas hasta la Península de Yucatán (Howell & Webb, 1995; Berlanga et al., 2015).

La zona sur de Tamaulipas, por su combinación de ecosistemas costeros, estuarinos y lagunares, representa un hábitat favorable para esta especie. En particular, cuerpos de agua como la Laguna del Carpintero en Tampico, las marismas y lagunas de Altamira, así como los sistemas asociados al Río Pánuco, ofrecen condiciones adecuadas para su alimentación, descanso y, posiblemente, reproducción. Estos ambientes se caracterizan por su alta productividad biológica, presencia de manglares (Rhizophora mangle, Avicennia germinans), tulares (Typha domingensis) y vegetación acuática emergente que proporcionan refugio y recursos tróficos (CONABIO, 2020).

La observación recurrente de ejemplares de A. herodias en estas áreas sugiere que el sur de Tamaulipas forma parte de su ruta migratoria del corredor del Golfo, reconocido por la Convención Ramsar (2022) como uno de los ejes de conectividad más importantes para las aves acuáticas del continente americano. Este patrón de uso del hábitat coincide con la teoría de la conectividad ecológica (Crooks & Sanjayan, 2006), que destaca la función de los humedales costeros como escalas ecológicas esenciales para especies que dependen de recursos dispersos espacialmente.

Sin embargo, la creciente urbanización, industrialización y contaminación de los cuerpos de agua en la región representan

amenazas latentes para la permanencia de estas aves, pues alteran la calidad del hábitat y la disponibilidad de alimento. Por ello, la documentación de su presencia en sitios como la Laguna del Carpintero y las marismas de Altamira constituye un indicador ecológico valioso y refuerza la necesidad de impulsar estrategias de monitoreo, manejo y conservación a nivel regional.. No se cuenta con estudios que muestren la distribución actual de la especie en la zona.

3.3 *Hábitat y alimentación*

Se localizan principalmente en marismas de agua dulce, salobre y rara vez salada, en las orillas de lagos, ríos, lagunas y manglares, encontrándose durante el invierno en la costa, línea de playa, bahías y planicies de lodo. Desde los 0 a 2500 m (AOU, 1998). Su conducta de alimentación consiste en buscar a su presa en forma quieta o caminando a la orilla del cuerpo de agua (Martínez Villalta y Motis, 1992). Localizan la presa con la vista y la capturan con un rápido jalón de cuello y cabeza, atrapándola entre las mandíbulas. Casi siempre se tragan toda la presa. La dieta es variada, a menudo cazan vadeando lentamente o esperando a la presa en el agua somera (Butler, 1992).

4. MONITOREO DE ARDEA HERODIAS

El Conteo por Puntos es el principal método de monitoreo de aves terrestres usado en un gran número de países, debido a su eficacia en todo tipo de terrenos y hábitats, asi como la utilidad de los datos obtenidos (Ralph et al., 1995, 1995a, 1996; Colin et al., 1998, Huff et al., 2000).

La literatura recomienda establecer el Conteo por Puntos en parcelas cuadradas, de manera que cubran la mayor cantidad de hábitats descritos en el área de estudio (Ralph et al. 1996). Sin embargo, para el presente estudio es imposible realizar una versión fehaciente de este enfoque ya que muchos puntos de muestreo son de difícil acceso. Esto impide la aplicación de tal método por lo que se optó por la combinación de este método con otro que ofreciera similares resultados. El método seleccionado fue Transecto Lineal con Conteo por Puntos. Éste se basa en establecer transectos más o menos lineales con puntos de conteo, tratando de abarcar los tipos de vegetación que representan el lugar. Los transectos se establecieron a partir de las variables de grado de intervención antrópica, tipos de vegetación y uso de suelo que existen en la comunidad. Al considerar estas variables se aplicaron en las 6 zonas ya definidas para este estudio.

Para las observaciones realizadas se empleó como equipo de monitoreo una lancha de 18 ft con motor fuera de borda de 25 hp, una cámara fotográfica marca Sony Modelo DSLR/A200 con lentes de 70-300 m con parasol y de corto alcance de 18-70 m ambos de la marca SIGMA con memoria interior de 4Gb marca SONY, así como una cámara FUJIFILM modelo FINEPIXS4800 con lente SUPERWIDE de 24-720 mm de 30X. Para la ubicación se utilizó un GPS tipo Magellan Meridian Platinum Mod. 203157-XX1.

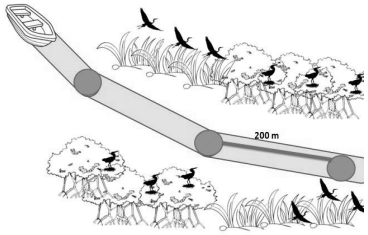


Figura 4. Esquema representativo del método.

La posición geográfica de cada avistamiento que comprende la zona de alimentación, pernoctación y reproducción se tomó con la ayuda de un GPS tipo Magellan Meridian Platinum Mod. 203157-XX1 que nos indica la ubicación, marcando un waypoint para cada punto localizado mediante coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM). Empleando el programa ArcGIS versión 10.0 se capturó cada waypoint designandole la clave para cada punto, correspondiendo una posición geográfica por cada uno de los organismos observados durante todos los transectos y generando los mapas de zonificación y distribución.

El monitoreo de campo se llevó a cabo durante los meses de noviembre y diciembre de 2024 realizándose 20 visitas de sondeo distribuidas durante este periodo en la zona de estudio, realizadas por 5 brigadas de 3 personas cada una, incluyendo 1 biólogo o 1 Ing. Ambiental más dos apoyos, utilizando en los recorridos Vía Terrestre Vehículo Tsuru 2012 y Camioneta Ram 4 x 4, y Vía Acuática una lancha con motor fuera de borda de 25 hp. En la tabla 1 se muestra la distribución de las visitas.

Tabla 1. Distribución de frecuencia de monitoreo.

	FECHAS DE MONITOREOS				
SEMANA	1	2	3	4	5
NOVIEMBRE		8, 9	12, 15, 16	19, 22, 23	26, 29, 30
DICIEMBRE	3, 6, 7	10, 13, 14	16, 19, 20		

5. RESULTADOS

De acuerdo a la metodología empleada se ubicaron cada uno de los avistamientos en mapas de distribución para cada zona, como se muestra a continuación:

ZONA 1. LAGUNA DEL CHAIREL: Se ubicó la distribución de 65 avistamientos (en su mayoría adultos) mediante un waypoint, durante los 20 recorridos realizados en la Laguna del Chairel como lo muestra la figura 9, mediante el mapa de distribución de la *Ardea herodias* en esta zona. Se presentaron la mayor incidencia los días 7 y 13 de diciembre con 5 ejemplares, y la menor incidencia los días 12 y 19 de noviembre y 20 de diciembre con 2 ejemplares como puede verse en la gráfica 2.

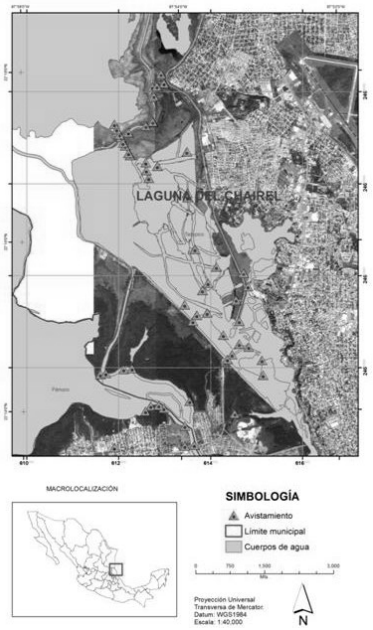


Figura 5. Ubicación Zona 1 Laguna del Chairel.

ZONA 2. LAGUNA DE PUEBLO VIEJO "ISLOTES": Se ubicó la distribución de 4 avistamientos (adultos) mediante puntos de waypoint, durante los 20 recorridos realizados en los islotes de la Laguna de Pueblo Viejo, Veracruz, como lo muestra la figura 10, mediante el mapa de distribución de la *Ardea herodias* en la zona.

Figura 6. Ubicación Zona 2 Laguna del Pueblo Viejo "islotes".

ZONA 3. LAGUNA DE PUEBLO VIEJO "MÁRGENES": Se ubicó la distribución de 158 avistamientos (en su mayoría adultos) mediante un waypoint, por individuo durante los 20 recorridos realizados en la Laguna de Pueblo Viejo como lo muestra la figura 11, mediante el mapa de distribución de la *Ardea herodias* en esta zona.

Figura 7. Ubicación Zona 3 Laguna del Pueblo Viejo "márgenes".

ZONA 4 Y 5. RÍO PÁNUCO MARGEN DERECHA E IZQUIERDA: Se ubicó la distribución de 114 avistamientos (en su mayoría adultos) en ambas márgenes mediante un waypoint, por individuo durante los 20 recorridos realizados en las márgenes del Río Pánuco, dada la cercanía y el libre tránsito del ave entre una margen y otra, se consideró analizar en forma conjunta los datos obtenidos de muestreo, como lo muestra la figura 12 en el mapa de distribución de *Ardea herodias* en la zona.

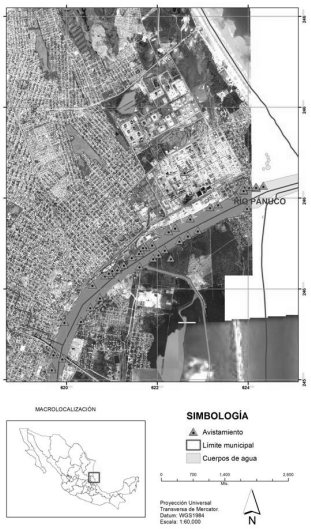


Figura 8. Ubicación de puntos de avistamiento en Zonas 4 y 5 de las márgenes de Río Pánuco.

ZONA 6. LAGUNA DEL CARPINTERO: Se ubicó la distribución de 1 avistamientos (adulto) mediante un waypoint, por individuo durante los 10 recorridos realizados en la Laguna del Carpintero como lo muestra la figura 9, mediante el mapa de distribución de la *Ardea herodias* en esta zona.

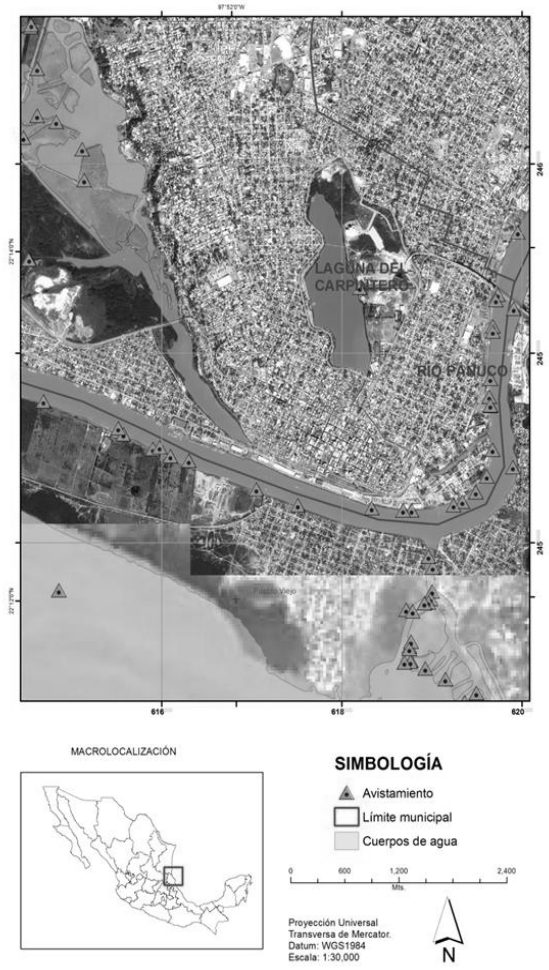


Figura 9. Ubicación de puntos de avistamiento en Zonas 4 y 5 de las márgenes de Río Pánuco.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio confirma la presencia y distribución de Ardea herodias (garza gris) en la zona sur del estado de Tamaulipas, abarcando cuerpos de agua como la Laguna del Chairel, Laguna del Carpintero, Río Pánuco y la Laguna de Pueblo Viejo. La identificación recurrente de individuos sugiere que estas zonas constituyen hábitats relevantes para su alimentación, pernoctación y posible reproducción. No obstante, debido a la naturaleza migratoria y amplia distribución geográfica de la especie, el presente estudio no puede establecer de manera concluyente si las poblaciones observadas son residentes o migratorias, lo cual coincide con lo señalado por Peterson y Chalif (2008), quienes describen a A. herodias como una especie con amplia plasticidad ecológica y comportamiento migratorio parcial.

De acuerdo con la teoría ecológica de los humedales costeros como ecosistemas de transición (Mitsch & Gosselink, 2015), las lagunas y márgenes fluviales del sur de Tamaulipas cumplen funciones esenciales para las aves acuáticas: proveen alimento, refugio y sitios de descanso durante las rutas migratorias del corredor Mesoamericano. En este contexto, la conservación de estos hábitats resulta prioritaria, ya que la degradación por expansión urbana, contaminación y actividades industriales puede alterar la estructura trófica y los patrones de uso de hábitat de las especies (Ramsar, 2022).

Por lo tanto, se recomienda que futuras investigaciones se desarrollen de manera continua durante un periodo mínimo de 3 a 5 años consecutivos, para determinar la residencia temporal o permanente de la garza gris, así como su relación con la variación estacional del clima y la disponibilidad de alimento. Este enfoque longitudinal permitiría generar modelos poblacionales más precisos y fortalecer la gestión ambiental local.

Asimismo, se sugiere la implementación de Programas de Concientización y Manejo de Ardea herodias dirigidos tanto a la población en general como al sector industrial, especialmente a las empresas que integran el API-Tampico (Administración Portuaria Integral de Tamaulipas). Estos programas deberían alinearse con los principios del Manejo Integrado de Humedales (MIH) y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 14 y 15) de la Agenda 2030, que promueven la conservación de la vida marina y terrestre.

El fortalecimiento de la educación ambiental y la corresponsabilidad social de los sectores productivos contribuirá a reducir las presiones sobre los ecosistemas ribereños y a garantizar la coexistencia entre las actividades humanas y la biodiversidad. De esta manera, el conocimiento generado por este estudio constituye un aporte científico inicial para futuras acciones de monitoreo, conservación y gestión ecológica de la garza gris en el sistema lagunar del sur de Tamaulipas.

REFERENCIAS

AMBIO. (2013). Las aves como indicadores de Biodiversidad para el programa Scolel'Te. Obtenido de Conservacion internacional mexico.

Arcos E. Gabriel, J. H. (2012). XXII Congreso nacional de hidraulica. Obtenido de Modelacion hidraulica y de calidad del agua de la laguna del carpintero.

CONANP. (2014). Monitores de especies de aves acuaticas y terrestes. Obtenido de Ecobiosfera el triunfo.

Cruz, T. (2010). Dragado en la Laguna Pueblo Viejo, Veracruz. Obtenido de Manifestacion de Impacto Ambiental.

Cuellar, G. J. (15 de diciembre de 2014). Aportación sobre el estatus de los cuerpos lagunares en la Zona Sur del estado de Tamaulipas y nombres cientificos de las espcies que las habitan. (A. Maria, Entrevistador)

Domitilo P. Díaz, J. A. (2005). Inundaciones en el estado. Obtenido de Hidrología de superficie y precipitaciones Intensas.

Guadalupe B. Escocia, W. C. (2006). Estudio preliminar de contaminación bacteriológica en la laguna . Obtenido de Estudio preliminar de contaminacion bacteriologica en la laguna .

J. A. González, O. A.–O. (2010). Evaluación de estimadores no paramétricos de la riqueza de especies. Un ejemplo con aves en áreas verdes de la ciudad de Puebla, México. Obtenido de Animal Biodiversity and Conservation.

José Luis de la Cruz R, A. T. (2013). Laguna del carpintero . Obtenido de Area de amortiguamiento urbano.

León, M. D. (2007). Políticas y gestión pública para el estudio municipal. Obtenido de El municipio en tamaulipas: su marco juridico actual y problemática.

Manuel C. R., R. Z. (2013). Patrones de la diversidad de peces en la laguna de Pueblo Viejo,Veracruz, México. Hidrobiológica, 289-298.

Novelo, M. M. (2014). La vegetación acuática del estado de Tamaulipas, Mexico . Obtenido de La vegetación acuática del estado de Tamaulipas, Mexico .

RIS, P. S. (2007). Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres. Obtenido de Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres.

Rzedowski, J. (1983). Vegetación de México. México, Df.: Limusa.

SEMANART. (2012). Protocolo de monitoreo . Obtenido de Monitoreo d Figura 9. Ubicación Zona 6 Laguna del Carpintero.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Literature review of digital cognitive assessment for remote dementia detection

López Primo Lluvia Arely*, Hernández Castañeda Daniela*, Gómez Aguilar José Francisco, Hernández Galván Adela*****

*Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México

(e-mail: {m24ce100, daniela.hc}@cenidet.tecnm.mx).

**Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM, Cuernavaca, Morelos, México

(e-mail: jose.ga@cenidet.tecnm.mx).

*** Centro de Investigación Transdisciplinar en Psicología, UAEM, Cuernavaca, Morelos, México

(e-mail: adela.hernandez@uaem.mx).

Abstract: Digital cognitive assessments represent a transformative innovation for the early detection of cognitive decline and Alzheimer's disease. This review analyzed 15 studies focusing on unsupervised remote assessment, identifying 15 tools across mobile, web, and VR platforms. The results show high feasibility and adherence of up to 86% and good validity with clinical trials. Digital cognitive assessments were shown to have good validity compared to traditional clinical assessments and are highly sensitive to preclinical changes, improving diagnostic accuracy to nearly 90% when combined with plasma biomarkers. This positions them as a scalable and valid alternative for mass screening and research.

Keywords: Digital Cognitive Assessment, dementia, Alzheimer´s Disease, mobile devices, remote assessment and self-administered

1. INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud, la demencia representa una carga mundial para los gobiernos y uno de los principales desafíos de salud pública del siglo XXI, que afecta a 55,2 millones de personas a nivel mundial, con proyecciones que estiman un incremento en 78 millones para 2030 y de 139 millones para 2050 (WHO, 2021). Conforme la esperanza de vida aumenta, se eleva también la cantidad de personas que padecen demencia, lo que ha impulsado la necesidad de descubrir e implementar estrategias de prevención más efectivas (Livingston et al., 2024).

Las evaluaciones cognitivas tradicionales, a pesar de ser consideradas el estándar clínico, enfrentan importantes limitaciones en la atención primaria. Entre estas se destaca que: existe una variedad de herramientas que dificultan la estandarización, tienen propiedades psicométricas deficientes, la escasa integración con los sistemas electrónicos de salud limita su utilidad, no favorecen una interpretación ni seguimiento adecuados del paciente, y generan una carga administrativa considerable para los médicos (Mattke et al., 2023). Estas dificultades son especialmente evidentes en países en desarrollo y con ingresos bajos, así como en poblaciones con bajo nivel educativo y analfabetas, particularmente donde el acceso a servicios neurológicos es escaso (Zegarra-Valdivia et al., 2025).

La pandemia mundial de COVID-19 aceleró la adopción de las tecnologías digitales debido a la necesidad de prevenir el deterioro cognitivo en la creciente población de adultos mayores con enfermedades mentales. Las aplicaciones informáticas se han vuelto esenciales, ya que permiten evaluar y entrenar las funciones cognitivas de manera eficiente, brindando una solución accesible y segura (Cubillos, 2023).

En este contexto, las evaluaciones cognitivas digitales realizadas de forma remota, brindan la posibilidad de una detección temprana más precisa de cambios patológicos en trastornos neurodegenerativos y conseguirían ser apropiadas para realizar una evaluación cognitiva más amplia en las clínicas (Thompson et al., 2023).

El objetivo de este artículo es revisar el estado del arte de las evaluaciones cognitivas digitales. Se centra en las pruebas para la detección remota de demencia, analizando las herramientas disponibles, su efectividad diagnóstica y las perspectivas futuras de esta modalidad de evaluación.

En esta primera etapa se presenta una visión general del estudio y se detalla la estructura del artículo, el cual se organiza en siete secciones principales. La sección 2 aborda los fundamentos conceptuales del trabajo de investigación, la sección 3 presenta la metodología de la revisión del estado del arte, la sección 4 describe el estado del arte de los estudios relevantes en el área, en la sección 5 se presenta una comparación de las investigaciones revisadas; posteriormente, la sección 6 presenta los resultados de los hallazgos principales y la sección 7 cierra con las conclusiones del análisis, discutiendo las implicaciones para la práctica clínica.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Evaluación Cognitiva Tradicional

La evaluación cognitiva tradicional se basa en el uso de pruebas estandarizadas que son administradas por profesionales capacitados dentro de entornos clínicos controlados. Entre los instrumentos de uso común, se destacan el Mini-Mental State Examination (MMSE) (Truong et al. 2024), y el Montreal Cognitive Assessment (MoCA), (Nasreddine et al., 2014), los cuales han demostrado una amplia validación para la detección de deficiencias en diversos dominios cognitivos.

Sin embargo, estas evaluaciones presentan limitaciones notables: se ha encontrado que los datos normativos se sustentan en muestras pequeñas y presentan datos de validez limitados. Además, existen dominios cognitivos específicos que están subrepresentados, se observa una gama limitada de idiomas e influencias culturales y los procedimientos estándar de las pruebas tradicionales suelen diferir de las actividades del mundo real (Howieson, 2019).

2.2 Evaluación Cognitiva Digital

Las tecnologías digitales por su parte, brindan una posibilidad para mitigar los retos que actualmente afrontan los profesionales médicos en la evaluación y manejo de la función cognitiva. Las herramientas empleadas para supervisar y mantener los dominios cognitivos afectados por la memoria representan un campo lleno de oportunidades (Chinner et al., 2018).

Las evaluaciones computarizadas se consideran adecuadas para la detección temprana de cambios cognitivos en adultos mayores. Al administrarse en un formato estandarizado, tienen la capacidad de registrar con precisión la exactitud y la velocidad de respuesta, alcanzando así un nivel de sensibilidad superior al que se logra con las evaluaciones cognitivas tradicionales (Wild et al., 2008).

De esta manera, las evaluaciones cognitivas digitales, particularmente cuando se aplican de forma remota, se consideran significativas para la detección y el monitoreo de la enfermedad del Alzheimer preclínica (Öhman et al., 2021).

2.3 Pruebas cognitivas digitales

Por lo tanto, para determinar la condición cognitiva de una persona, la evaluación se basa en la aplicación de pruebas cognitivas estandarizadas. Actualmente, la evidencia sugiere que la realización de estas pruebas en adultos mayores sanos es en gran medida factible, y los datos recopilados son confiables. Este hallazgo abre la puerta para el uso de dichas herramientas en estudios de carácter longitudinal (Polk et al., 2025).

3. METODOLOGÍA

Esta investigación se realizó mediante una revisión cualitativa/descriptiva del estado del arte, con el objetivo de identificar, describir y analizar las pruebas utilizadas en la detección remota de demencia. Aplicando una estrategia sistemática de búsqueda, selección y análisis de literatura académica, se examinaron las herramientas disponibles, su precisión diagnóstica y las perspectivas futuras de esta modalidad de evaluación,

3.1 Estrategia de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó entre junio y agosto de 2025, consultando las bases de datos: PubMed y Google Schoolar. Se emplearon combinaciones de palabras clave en inglés, tales como: (“digital cognitive assessment” OR “cognitive screening” OR “remote assessment”) AND (“unsupervised” OR “self-administered”) AND (“dementia”, OR “Alzheimer´s disease”).

3.2 Criterios de inclusión y exclusión

Se abarcaron artículos que cumplieran los siguientes criterios de inclusión:

- ✓ Publicados entre 2022 y 2025.
- ✓ De revistas científicas indexadas.
- ✓ Escritos en inglés.
- ✓ En modalidad de aplicación digital y remota.
- ✓ Con enfoque centrado en la evaluación y cribado cognitivo.
- ✓ De poblaciones clínicas con deterioro cognitivo leve, enfermedad de Alzheimer y demencia.

Se excluyeron documentos:

- × De carácter no académico (sin revisión por pares como editoriales, cartas al editor, capítulos de libros).
- × Publicados en idiomas distintos al inglés.
- × Con modalidad de aplicación presencial.
- × Que abordan trastornos no relacionados con la demencia (esquizofrenia, trastorno del sueño).

3.3 Análisis de la información

Una vez seleccionados los estudios pertinentes, se realizó un análisis de contenido cualitativo mediante la descripción de cada artículo analizado, posteriormente, se exponen los hallazgos proporcionando una comparativa en la Tabla 1 y la visualización de las herramientas más destacadas en la Figura 1. Este enfoque permitió mapear las pruebas utilizadas, destacar su efectividad diagnóstica frente a pruebas tradicionales, distinguir los desafíos y determinar los vacíos de conocimiento que justifican futuras línea de investigación.

4. ESTADO DEL ARTE

La revisión del estado del arte en evaluaciones cognitivas digitales y remotas para detección de demencia revela un campo que ha crecido exponencialmente en los últimos años. Este crecimiento se atribuye a los avances tecnológicos, las necesidades clínicas emergentes y la pandemia de COVID-19, que impulsó la adopción de soluciones en salud digital.

Las evaluaciones cognitivas digitales se han presentado en diversos artículos. En esta sección se presenta un análisis de 15 artículos de revistas JCR, seleccionados por su impacto clínico y contribuciones innovadoras. La literatura revisada incluye estudios que van desde validaciones psicométricas y diagnósticas hasta la viabilidad de nuevas herramientas, en cohortes de diversos tamaños. A continuación, se presenta una descripción de cada artículo analizado:

En el trabajo de Berron et al. (2024) evaluaron la viabilidad, validez y fiabilidad de evaluaciones de memoria digitales, remotas y sin supervisión, y exploraron su utilidad para el diagnóstico y pronóstico de la enfermedad de Alzheimer. Los resultados principales del estudio demostraron que estas evaluaciones poseen una buena validez de constructo y se asocian significativamente con biomarcadores de tau.

En este trabajo de Jutten et al. (2025) examinaron la viabilidad de la herramienta Mobile Toolbox (MTB), una evaluación cognitiva remota basada en teléfonos inteligentes, así como su asociación con pruebas clínicas y biomarcadores de la enfermedad de Alzheimer en adultos mayores. Los resultados principales del estudio demostraron que el MTB fue factible y que sus puntuaciones se asociaron negativamente con la deposición de tau.

En el trabajo de Moore et al. (2022) evaluaron la viabilidad y validez de las pruebas cognitivas ecológicas momentáneas (EMCT) en adultos mayores con deterioro cognitivo leve y en controles cognitivamente normales. Los resultados principales revelaron una alta adherencia a las pruebas, con un 85% de finalización, sin diferencias significativas entre los grupos.

Na, S., Lee, E.-S. y Lee, T.-K. (2023) analizaron el rendimiento diagnóstico de una prueba de detección cognitiva basada en tableta, conocida como Inbrain CST, para identificar el deterioro cognitivo leve amnésico. Los resultados principales del estudio revelaron que la prueba posee una sensibilidad del 81.7% y una especificidad del 84,9%.

En el trabajo de Tideman et al. (2025) evaluaron la eficiencia de una batería de pruebas cognitivas digitales autoadministradas (BioCog) y biomarcadores sanguíneos para detectar la enfermedad de Alzheimer en la atención primaria. Los resultados principales del estudio mostraron que la prueba BioCog, con una precisión del 85%, superó la evaluación realizada por médicos de atención primaria, la cual alcanzó un 73% de precisión.

En Tsoy et al. (2024) examinaron la precisión de los biomarcadores plasmáticos y una prueba cognitiva digital para el diagnóstico y pronóstico de la enfermedad de Alzheimer. Los resultados principales del estudio revelaron que la combinación de biomarcadores plasmáticos y la prueba cognitiva digital (TabCAT-BHA) fue la mejor opción para predecir la positividad del amiloide, la gravedad de la enfermedad y el deterioro funcional.

En el trabajo de Malzbender et al. (2024) desarrollaron, validaron e implementaron en entornos reales una caja de herramientas modular (AD-RIDDLE) para la detección temprana de la enfermedad de Alzheimer. Los resultados del proyecto se enfocaron en la creación de una plataforma con el objetivo de mejorar la precisión y la rapidez del diagnóstico, la detección de riesgos y la integración de herramientas digitales y biomarcadores sanguíneos.

En este trabajo de Nie et al. (2023) evaluaron la eficiencia de una nueva herramienta de autoevaluación cognitiva de dos pasos (TCSA), basada en pantalla táctil, para la detección de la función cognitiva en una población china de edad avanzada. Los resultados principales del estudio indicaron que la TCSA es una herramienta eficaz, ya que demostró una buena precisión para detectar tanto el deterioro cognitivo leve como la demencia clínicamente diagnosticada.

En el trabajo de Zhao et al. (2024) evaluaron la validez, viabilidad y eficacia de una herramienta de detección cognitiva digital basada en el reconocimiento de voz (CogMo) a gran escala, especialmente en adultos mayores chinos que viven en la comunidad. Los resultados principales del estudio demostraron que la herramienta tiene una alta correlación con las pruebas tradicionales y una adecuada validez y fiabilidad para discriminar el deterioro cognitivo.

En Wu et al. (2023) desarrollaron y validaron una herramienta de detección de bajo costo y fácil acceso llamada EOmciSS, con el objetivo de cribar el deterioro cognitivo leve en adultos mayores de la comunidad. El estudio encontró que el EOmciSS es una herramienta válida y confiable, con una sensibilidad del 84,9% y una especificidad del 85,1% para identificar a las personas en riesgo.

En Saito et al. (2022) verificaron la validez y fiabilidad de la versión japonesa de la prueba Mini-Cog a través de una aplicación para teléfono inteligente, con el objetivo de permitir la autoevaluación de la función cognitiva en una población a gran escala. Los resultados principales del estudio mostraron que la aplicación posee una validez aceptable, Sin embargo, la fiabilidad test-retest fue menor de lo esperado, lo cual se atribuyó a los efectos de aprendizaje y de orden.

En el trabajo de Nicosia et al. (2023) examinaron la fiabilidad, validez y viabilidad de la batería de evaluaciones cognitivas de investigación ambulatoria en cognición (ARC), la cual fue diseñada para ser administrada sin supervisión a través teléfonos inteligentes. Los resultados principales del estudio revelaron que las evaluaciones digitales son una herramienta fiable y válida para analizar los cambios cognitivos vinculados con las fases iniciales de la enfermedad.

En Papp et al. (2024) determinaron si las evaluaciones cognitivas digitales diarias podían revelar cambios en la consolidación de la memoria asociados a la presencia de la proteína B-amiloide (AB) en adultos mayores cognitivamente normales. Los resultados principales mostraron que los participantes AB-positivos exhibieron una curva de aprendizaje disminuida en la prueba digital, una diferencia que resulto indetectable con pruebas tradicionales de una sesión.

En este trabajo de Paterson et al. (2022) evaluaron la precisión de una herramienta de evaluación cognitiva de salud cerebral en línea (BHA) y autoadministrada para detectar el deterioro cognitivo leve amnésico (aMCI). Los resultados principales del estudio mostraron que la prueba digital es eficaz, ya que posee una buena precisión diagnóstica para diferenciar entre adultos mayores con deterioro cognitivo leve amnésico y aquellos con una función cognitiva normal.

En el trabajo de Lai et al. (2025) evaluaron la aceptabilidad y viabilidad de la tares de memoria de trabajo en Realidad Virtual (VRWMT) como herramienta de cribado cognitivo en adultos mayores. Los resultados principales del estudio indicaron que la aceptación y la viabilidad del sistema varían

significativamente en función de la familiaridad tecnológica de los participantes.

Los resultados que se obtuvieron en los estudios analizados respaldan la viabilidad de las evaluaciones cognitivas digitales y remotas como herramientas que pueden detectar el deterioro cognitivo de forma fiable. Lo que es un gran indicador de que estas herramientas pueden suplementar las limitaciones de las pruebas de lápiz y papel.

5. COMPARACIÓN

En esta sección se presentan las diferentes herramientas de evaluación cognitiva remota abordadas en la presente investigación. La Tabla 1 proporciona una comparativa de cada artículo analizado. Los títulos de las columnas hacen referencia a la siguiente información: Ref.: hace referencia a la cita bibliográfica del artículo, Herramienta empleada: menciona el nombre de la herramienta utilizada en el estudio y, Efectividad: presenta la efectividad diagnóstica de la herramienta analizada.

Tabla 1. Comparativa de la efectividad diagnóstica de las herramientas de evaluación cognitiva remota

Ref.	Herramienta empleada	Efectividad
Berron, D. et al. (2024)	MDT-S & ORR-DR	Al combinarse con biomarcadores de EA mejora la predicción del declive cognitivo futuro.
Jutten, R.J. et al. (2025)	MTB (Mobile Toolbox)	Para capturar procesos cognitivos relevantes en etapas preclínicas de la EA.
Moore, R.C. et al. (2022)	EMCT	Demostró correlación entre el rendimiento en las pruebas móviles y las pruebas neuropsicológicas estándar para medir cambios cognitivos a lo largo del tiempo.
Na, S., Lee, E.-S. y Lee, T.-K. (2023)	Inbrain CST	La herramienta es viable con una precisión del 83% en comparación con el CERAD-K.
Tideman, P. et al. (2025)	BioCog	Al combinar la prueba con biomarcadores sanguíneos la precisión diagnóstica aumentó al 90%.
Tsoy, E. et al. (2024)	TabCAT-BHA	La combinación de marcadores plasma y digitales es relevante para el diagnóstico y pronóstico de enfermedades relacionadas con la demencia tipo Alzheimer.
Malzbender, K. et al. (2024)	AD-RIDDLE Toolbox Platform	La plataforma ofrece una alternativa escalable y flexible para reducir barreras en la detección temprana de la EA.
Nie, J. et al. (2023)	TCSA	Buena validez discriminante para distinguir deterioro cognitivo de controles sanos. En participantes con niveles educativos más altos fue mejor que la del MMSE.
Zhao, X. et al. (2024)	DCS (Digital CogS)	Mayor capacidad discriminante que el MoCA y el MMSE, la aceptación y los resultados no estuvieron sesgados contra adultos mayores con menos educación.
Wu, J. et al. (2023)	EOmciSS	Capacidad de cribado fuerte en comparación con otras pruebas digitales. La precisión y la velocidad de los elementos de recuerdo retrasado fueron predictores significativos de deterioro cognitivo.
Saito, Y. et al. (2022)	ARC (Adaptive Response Cognitive)	Buena validez de constructo y predictiva, excelente adherencia del 80.42% y alta fiabilidad test-retest.
Nicosia, J. et al. (2023)	MDLC (Multidomain Learning Curve)	Paradigma capaz de diferenciar grupos de beta amiloide positivo y negativo, a diferencia de las evaluaciones cognitivas estándar de un solo punto temporal.
Papp, K.V. et al. (2024)	Multiday BRANCH (Boston Remote Assessment for Neurocognitive Health)	La herramienta indica que los fallos tempranos en la consolidación de la memoria son un biomarcador cognitivo inicial de la enfermedad de Alzheimer preclínica. La curva de aprendizaje disminuida es un predictor fuerte de mayor declive anual en PACC-5 que las medidas de un solo punto temporal.
Paterson, T.S.E. et al. (2022)	BHA	Mostró una precisión diagnóstica del 68%, similar al MoCA y ligera ventaja en la identificación de controles normales.

Lai, F.H.-Y. et al. (2025)	VRWMT (Virtual Reality Working Memory Task)	El estudio se centró en la aceptabilidad y viabilidad, no evaluó la efectividad diagnóstica. Sin embargo, la alta familiaridad tecnológica y el estatus socio-demográfico más alto se correlacionaron con que la herramienta fuera más útil, fácil y atractiva.

La investigación confirma la tendencia hacia los marcadores digitales multimodales, pues herramientas como BioCog, combinadas con biomarcadores, alcanzaron el 90% de precisión diagnóstica, superando la efectividad de pruebas como BHA con el 68%. Mientras la Tabla 1 ofrece una comparación detallada de cada artículo, la Figura 1 presenta una visualización de la efectividad diagnóstica de las herramientas más destacadas, mostrando como estas superan la capacidad discriminante de pruebas tradicionales como el MMSE o el MoCA.

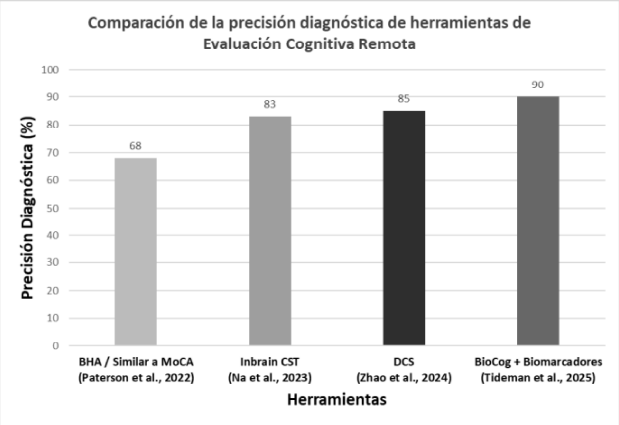


Figura 1. Comparativa de la efectividad diagnóstica de las herramientas de evaluación cognitiva remota. Elaboración propia basada en datos de Paterson et al. (2022), Na et al. (2023), Zhao et al. (2024) y Tideman et al. (2025).

6. RESULTADOS

5.1 Estado actual

El estado actual que reportan las herramientas de evaluación cognitiva remota, analizadas en esta investigación, se describe en el siguiente apartado.

Se observa que las herramientas de evaluación cognitiva digital ofrecen un gran potencial para la detección temprana de la Enfermedad de Alzheimer debido a su mayor sensibilidad y mejor validez ecológica (Malzbender et al., 2024; Nicosia et al., 2023; Papp et al., 2024). Específicamente, el deterioro de la consolidación de la memoria se identifica como el cambio más temprano detectable en la Enfermedad de Alzheimer preclínica (Papp et al., 2024). Además, se han desarrollado pruebas breves y rápidas, como TCSA (Nie et al., 2023) y el test de (Wu et al., 2023), que son apropiadas para el cribado comunitario, con tiempos de administración muy cortos.

Los trabajos de (Berron et al., 2024; Na et al., 2023; Tideman et al., 2025; Zhao et al., 2024) destacan la fiabilidad, eficiencia y rentabilidad de las evaluaciones digitales. Se observa que herramientas como BioCog (Tideman et al., 2025) e Inbrain CST (Na et al., 2023) son robustas, eliminan la variabilidad del evaluador, y no requieren de un experto, con el potencial de suplementar las limitaciones de los tests tradicionales de lápiz y papel. Además, BioCog y la combinación de marcadores plasma y digitales de (Tsoy et al., 2024) aumentan la certeza diagnóstica de la Enfermedad de Alzheimer.

La factibilidad y alta adherencia de los enfoques remotos y digitales se reporta consistentemente en la literatura. Los estudios de (Jutten et al., 2025; Moore et al., 2022; Lai et al., 2025) indican que los protocolos como MTB y EMCT son factibles y bien tolerados en adultos mayores. En particular, el diseño breve y gamificado del protocolo EMCT de (Moore et al., 2022), contribuye a una alta adherencia, mientras que la herramienta del trabajo de (Lai et al., 2025) es aceptada y viable, enfatizando la importancia de la adaptación para las necesidades de los usuarios.

5.2 Perspectivas futuras

Las perspectivas futuras en el ámbito de la evaluación cognitiva digital, según los estudios analizados, destacan de forma recurrente la importancia de validar rigurosamente los instrumentos utilizados y de ampliar la representatividad de las muestras incluidas en las investigaciones (Jutten et al., 2025; Moore et al., 2022; Tsoy et al., 2024; Papp et al., 2024; Paterson et al., 2022; Lai et al., 2025). Los investigadores sugieren trabajar con muestras más grandes, diversas y socioeconómicamente representativas, con el fin de replicar los hallazgos en comunidades más amplias y validar su efectividad a largo plazo. Además, se considera crucial identificar la combinación óptima de marcadores escalables que permitan mejorar la precisión diagnóstica y pronóstica (Tsoy et al., 2024).

Se vislumbra la utilidad de estas herramientas para el cribado a gran escala y su aplicación en ensayos clínicos (Na et al., 2023; Nie et al., 2023; Wu et al., 2023; Nicosia et al., 2023; Papp et al., 2024). En particular, se propone que Inbrain CST es apropiado para tareas de vigilancia en salud pública (Na et al., 2023), mientras que el test desarrollado por Wu et al. (2023) podría servir como prueba de primera línea para la identificación de riesgos en la comunidad. Asimismo, se destaca el potencial del paradigma descrito por Papp et al. (2024) para ser utilizado en ensayos clínicos breves y adaptativos, como una vía prometedora para rastrear la respuesta terapéutica.

Las herramientas digitales se perfilan como elementos transformadores para el diagnóstico y la gestión de la Enfermedad de Alzheimer (Tideman et al., 2025; Malzbender et al., 2024). Diversos estudios las consideran valiosas para el diagnóstico y pronóstico de Enfermedad de Alzheimer, especialmente cuando se combinan con biomarcadores plasmáticos, en línea con las recomendaciones globales para la atención primaria (Berron et al., 2024; Tideman et al., 2025). Adicionalmente, se espera que estas tecnologías contribuyan a

mejorar los resultados clínicos y a reducir los costos asociados a la gestión de la enfermedad (Malzbender et al., 2024).

7. CONCLUSIONES

Se concluye que las evaluaciones cognitivas digitales representan un avance significativo respecto a los métodos tradicionales de lápiz y papel, demostrando consistentemente ser herramientas fiables, eficientes y rentables para la detección del deterioro cognitivo y la Enfermedad de Alzheimer. Estos nuevos enfoques tecnológicos se caracterizan por su robustez y capacidad para eliminar la variabilidad asociada al evaluador y a la puntuación manual, a menudo sin requerir la intervención de un examinador experto. Además, la combinación de estas herramientas digitales con biomarcadores plasmáticos aumenta considerablemente la certeza diagnóstica, marcando una ruta clara hacia una práctica clínica más precisa y escalable.

La alta factibilidad y la buena tolerancia observadas en la población de adultos mayores son atributos clave de los protocolos remotos y digitales. Se ha evidenciado una alta adherencia por parte de los usuarios, impulsada principalmente por el diseño de herramientas breves, gamificadas y adaptables. Esta adaptabilidad es esencial para atender las diversas necesidades de los usuarios y asegurar tanto su aceptación como la viabilidad de estas herramientas en el uso diario y a largo plazo.

El potencial de las herramientas digitales para la detección temprana es muy alto, debido a su mayor sensibilidad y a una validez ecológica superior, lo que permite capturar cambios que las herramientas convencionales podrían omitir. Además, en este estudio se logró identificar que el deterioro en la consolidación de la memoria es el cambio más temprano detectable en las fases preclínicas de la Enfermedad de Alzheimer. Estas tecnologías se perfilan para transformar el diagnóstico y la gestión de la enfermedad, facilitando el cribado a gran escala en la comunidad y su aplicación en ensayos clínicos adaptativos para el seguimiento de la respuesta terapéutica.

Agradecimientos

Lluvia Arely López Primo agradece el apoyo brindado por el SECIHTI mediante la asignación de una beca de maestría. José Francisco Gómez Aguilar agradece el apoyo brindado por el SNII-SECIHTI.

REFERENCIAS

Berron, D. et al. (2024) “Remote and unsupervised digital memory assessments can reliably detect cognitive impairment in Alzheimer’s disease”, *Alzheimer’s & dementia: the journal of the Alzheimer’s Association*, 20(7), pp. 4775–4791. https://doi.org/10.1002/alz.13919

Chinner, A. et al. (2018) “Digital technologies for the assessment of cognition: a clinical review”, *Evidence-based mental health*, 21(2), pp. 67–71. https://doi.org/10.1136/eb-2018-102890

Cubillos, C. y Rienzo, A. (2023) “Digital cognitive assessment tests for older adults: Systematic literature review”, *JMIR mental health*, 10, p. e47487. https://doi.org/10.2196/47487

Howieson, D. (2019) “Current limitations of neuropsychological tests and assessment procedures”, *The clinical neuropsychologist*, 33(2), pp. 200–208. https://doi.org/10.1080/13854046.2018.1552762

Jutten, R.J. et al. (2025) “The Mobile Toolbox for remote, self-administered cognitive assessment in older adults: associations with in-clinic cognitive testing and Alzheimer’s disease biomarkers”, *Alzheimer’s & Dementia: Diagnosis, Assessment & Disease Monitoring,* 17(3), p. e70160. https://doi.org/10.1002/dad2.70160

Lai, F.H.-Y. et al. (2025) “Cognition in virtual reality: assessing user acceptability and feasibility of virtual reality cognitive screening for older adults”, *Frontiers in psychiatry*, 16, p. 1570594. https://doi.org/10.3389/fpsyt.2025.1570594

Livingston, G. et al. (2024) “Dementia prevention, intervention, and care: 2024 report of the Lancet standing Commission”, *Lancet*, 404(10452), pp. 572–628. https://doi.org/10.1016/s0140-6736(24)01296-0

Malzbender, K. et al. (2024) “Validation, Deployment, and Real-World Implementation of a modular toolbox for Alzheimer’s disease detection and dementia risk reduction: The AD-RIDDLE project”, *The Journal of Prevention of Alzheimer’s Disease*, 11(2), pp. 329–338. https://doi.org/10.14283/jpad.2024.32

Mattke, S. et al. (2023) “Expanding the use of brief cognitive assessments to detect suspected early-stage cognitive impairment in primary care”, *Alzheimer’s & dementia: the journal of the Alzheimer’s Association*, 19(9), pp. 4252–4259. https://doi.org/10.1002/alz.13051

Moore, R.C. et al. (2022) “Feasibility and validity of ecological momentary cognitive testing among older adults with mild cognitive impairment”, *Frontiers in digital health*, 4, p. 946685. https://doi.org/10.3389/fdgth.2022.946685

Na, S., Lee, E.-S. y Lee, T.-K. (2023) “Diagnostic performance of a tablet computer-based cognitive screening test for identification of amnestic mild cognitive impairment”, *Journal of Korean medical science*, 38(17), p. e131. https://doi.org/10.3346/jkms.2023.38.e131

Nasreddine, Z.S. et al. (2014) “Montreal Cognitive Assessment”, *PsycTESTS Dataset. American Psychological Association (APA)*. https://doi.org/10.1037/t27279-000

Nicosia, J. et al. (2023) “Unsupervised high-frequency smartphone-based cognitive assessments are reliable, valid, and feasible in older adults at risk for Alzheimer’s disease”, *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*, 29(5), pp. 459–471. https://doi.org/10.1017/s135561772200042x

Nie, J. et al. (2023) "Newly self-administered two-step tool for screening cognitive function in an ageing Chinese population: an exploratory cross-sectional study", *General psychiatry*, 36(1), p. e100837. https://doi.org/doi:10.1136/gpsych-2022-100837

Öhman, F. et al. (2021) "Current advances in digital cognitive assessment for preclinical Alzheimer's disease", *Alzheimer's & Dementia: Diagnosis, Assessment & Disease Monitoring*, 13(1), p. e12217. https://doi.org/10.1002/dad2.12217

Papp, K.V. et al. (2024) "Early detection of amyloid-related changes in memory among cognitively unimpaired older adults with daily digital testing", Annals of neurology, 95(3), pp. 507–517. https://doi.org/10.1002/ana.26833

Paterson, T.S.E. et al. (2022) "Accuracy of a self-administered online cognitive assessment in detecting amnestic mild cognitive impairment", *The journals of gerontology. Series B, Psychological sciences and social sciences*, 77(2), pp. 341–350. https://doi.org/10.1093/geronb/gbab097

Polk, S.E. et al. (2025) "A scoping review of remote and unsupervised digital cognitive assessments in preclinical Alzheimer's disease", *npj digital medicine*, 8(1), p. 266. https://doi.org/10.1038/s41746-025-01583-5

Saito, Y. et al. (2022) "Checking the validity and reliability of the Japanese version of the Mini-Cog using a smartphone application", *BMC research notes*, 15(1), p. 222. https://doi.org/10.1186/s13104-022-06101-4

Thompson, L.I. et al. (2023) "Remote and in-clinic digital cognitive screening tools outperform the MoCA to distinguish cerebral amyloid status among cognitively healthy older adults", *Alzheimer's & Dementia: Diagnosis, Assessment & Disease Monitoring*, 15(4), p. e12500. https://doi.org/10.1002/dad2.12500

Tideman, P. et al. (2025) "Primary care detection of Alzheimer's disease using a self-administered digital cognitive test and blood biomarkers", *Nature medicine*. https://doi.org/10.1038/s41591-025-03965-4

Truong, Q.C. et al. (2024) "Examining the validity of the Mini-Mental State Examination (MMSE) and its domains using network analysis", *Psychogeriatrics: the official journal of the Japanese Psychogeriatric Society*, 24(2), pp. 259–271. https://doi.org/10.1111/psyg.13069

Tsoy, E. et al. (2024) "Scalable plasma and digital cognitive markers for diagnosis and prognosis of Alzheimer's disease and related dementias", *Alzheimer's & dementia: the journal of the Alzheimer's Association*, 20(3), pp. 2089–2101. https://doi.org/10.1002/alz.13686

Wild, K. et al. (2008) "Status of computerized cognitive testing in aging: a systematic review", *Alzheimer's & dementia: the journal of the Alzheimer's Association*, 4(6), pp. 428–437. https://doi.org/10.1016/j.jalz.2008.07.003

WHO. (2021). Global status report on the public health response to dementia: executive summary. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/350993/9789240038707-spa.pdf#page=7.10

Wu, J. et al. (2023) "An effective test (EOmciSS) for screening older adults with Mild Cognitive Impairment in a community setting: Development and validation study", *Journal of medical internet research*, 25, p. e40858. https://doi.org/10.2196/40858

Zegarra-Valdivia, J.A. et al. (2025) "Dementia and mild cognitive impairment identification in illiterate and low-educated people: Systematic review about the use of brief cognitive screening tools", *Behavioral sciences*, 15(2). https://doi.org/10.3390/bs15020207

Zhao, X. et al. (2024) "Validity, feasibility, and effectiveness of a voice-recognition based digital cognitive screener for dementia and mild cognitive impairment in community-dwelling older Chinese adults: A large-scale implementation study", *Alzheimer's & dementia: the journal of the Alzheimer's Association*, 20(4), pp. 2384–2396. https://doi.org/10.1002/alz.13668

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

The work skills present in engineering students of the Tecnológico Nacional de México

Moreno Núñez, E.* Rodríguez Lozano, K.V.* Flores Luevanos, M.G.* Aragón Guardado, J.A.*

** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Dgo. México MX (Tel: 8712215782; e-mail: {elda.mn, karla.rl, maria.fl, juan.ag}@itslerdo.edu.mx).*

Abstract: Competition in the 21st-century job market is fierce. Graduates from national universities not only compete with their Mexican peers but also with professionals from around the world. To meet this challenge, it is crucial for new professionals to develop the skills necessary for employment during their university education. The objective of this research was to identify the level of job competencies among students at the Instituto Tecnologico Superior de Lerdo, specifically those in their third and fourth years of engineering, who are nearing graduation. A quantitative, non-experimental, cross-sectional, and descriptive study was conducted. Data collection involved the use of a psychometric questionnaire, widely applied by employers in Mexico, to a stratified sample by specialty, consisting of 388 undergraduate students at Instituto Tecnologico Superior de Lerdo, Durango. The data were statistically analyzed to obtain measures of central tendency, dispersion, and normal distribution. Among the key findings, it was observed that students demonstrate skills in task organization and planning. However, their performance decreases as the complexity or duration of projects increases. They are capable of achieving objectives under pressure and seek to improve the quality of their work, but they face difficulties in guiding their peers and maintaining consistent team performance.

Keywords: Job competency; Labor market; Professional training.

1. INTRODUCCIÓN

La Oficina de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) refiere que las competencias laborales son el conjunto de capacidades que permiten a las personas desempeñar eficazmente las actividades relacionadas con el trabajo; un enfoque holístico incluye, además de las capacidades técnicas o de cualificación, las características personales como la actitud, la adaptabilidad, la tolerancia a la presión, entre otros. La competencia laboral asegura la ejecución exitosa de las tareas productivas, pues "no es una probabilidad de éxito en la ejecución de un trabajo; es una capacidad real y demostrada" (Vargas, 2004).

En México, la transición de los egresados universitarios al mercado laboral representa un reto significativo, influido por diversos factores, incluyendo la formación académica, la oferta y demanda laboral y las condiciones socioeconómicas. Las Encuestas Nacionales de Egresados (ENE), realizadas en 2022 y 2023 por la Universidad del Valle de México (UVM), ofrecen una visión detallada sobre las trayectorias laborales de los graduados de instituciones de educación superior, tanto públicas como privadas.

Según la ENE 2022, solamente el 51.1% de los egresados encontró su primer empleo en un área relacionada con su campo de estudio, lo que pone de manifiesto un desajuste entre la formación académica y las oportunidades laborales disponibles (UVM, 2022). Esas encuestas también destacan la importancia de las habilidades adquiridas durante la educación universitaria y su aplicación en el entorno laboral. Las competencias tecnológicas, de comunicación y trabajo en equipo son especialmente valoradas por los empleadores, y han demostrado ser esenciales en la adaptación de los egresados a un mercado laboral en constante cambio (UVM, 2022).

En esta encuesta (ENE, 2022) se indica que, en las carreras de ingeniería, las cuatro habilidades más utilizadas en el ámbito profesional son el trabajo en equipo, la comunicación verbal, la toma de decisiones y el liderazgo. No obstante, varias de estas competencias figuran entre las menos desarrolladas durante la formación académica. La encuesta revela también que los campos de estudio con mayor tendencia al emprendimiento son Ciencias Sociales, Administración y Derecho (42.6%), seguidos por Ingeniería, Manufactura y Construcción (19.6%), lo que evidencia una amplia brecha entre ambos sectores (UVM, 2022).

La situación laboral de los egresados ha mejorado ligeramente tras la pandemia, pero aún presenta desafíos. En 2023, el porcentaje de egresados empleados incrementó en comparación con el año anterior. Un 39.8% de los egresados trabaja en el sector privado y un 23.2% en el sector público, lo que representa un crecimiento del 9.4% y 6.4%, respectivamente, en comparación con 2022 (UVM, 2023). Este incremento sugiere una recuperación gradual del mercado laboral, aunque aún persisten desigualdades en términos de género y región.

Según la ENE de 2023, las áreas de ingeniería, manufactura y construcción, así como ciencias naturales, exactas y de la computación, continúan siendo las que ofrecen los ingresos

más altos para sus especialistas. El mismo estudio manifiesta una brecha existente entre las habilidades adquiridas y las demandas del mercado laboral: muchos egresados sienten que no desarrollaron las competencias adecuadas para su empleo actual, lo que sugiere la necesidad de una mayor alineación entre la educación superior y las necesidades del mercado (UVM, 2023).

A pesar de que un 73.8% de los egresados se mostró satisfecho con su empleo actual, una proporción significativa aún enfrenta desafíos en términos de remuneración y prestaciones. Solo el 27% de los egresados percibe un salario mensual en el rango de $8,001 a $15,000 pesos, y un 52.1% cuenta únicamente con las prestaciones de ley, lo que indica la necesidad de mejorar las condiciones laborales de los recién graduados (UVM, 2023).

Por otra parte, la universidad Western Michigan publica las habilidades que los empleadores buscan más en los egresados (Western Michigan University, 2024):

- Liderazgo. Capacidad de identificar y aprovechar las fortalezas de los miembros de su equipo para alcanzar metas comunes.
- Pensamiento crítico y capacidad de análisis. Capacidad de analizar cualquier tipo de problema, consideran las consecuencias de cada alternativa propuesta y toman decisiones con determinación.
- Comunicación efectiva, oral y escrita. Esto le permite al líder transmitir ideas en forma concreta y efectiva para asegurar que se transmitan los beneficios de los proyectos.
- Uso eficiente de la tecnología digital. El egresado debe aprovechar al máximo las herramientas tecnológicas para solucionar problemas, aumentar la productividad y lograr metas.
- Profesionalismo y ética laboral. Son la guía incluso si están en contra de los propios deseos.
- Gestión del tiempo. Realizar y finalizar todas las metas diarias de una manera efectiva.
- Autoconfianza y actitud positiva. Hacer frente a los problemas con soluciones efectivas.
- Inclusión. Abarca el aprender, apreciar y respetar los diferentes grupos, culturas, opiniones y perspectivas.
- Atención a los detalles. Todo líder debe buscar la excelencia y atender los proyectos de forma detallada.
- Inteligencia emocional y flexibilidad. Habilidad clave para el desarrollo de un entorno laboral sano. (Western Michigan University, 2024)

El Tecnológico Nacional de México (TecNM) es la institución más grande del país en educación superior tecnológica, con presencia en todo el territorio nacional a través de 254 institutos tecnológicos y centros. El Instituto Tecnológico Superior de Lerdo (ITSL) ubicado en Cd. Lerdo, Durango, forma parte de esta red. Según la Secretaría de Economía (2024) en el segundo trimestre del año la entidad registró una población económicamente activa de 829,692 personas, con una tasa de participación laboral del 59.9% y una desocupación del 2.81%, equivalente a 24,000 personas.

De acuerdo con la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE), durante el segundo trimestre de 2024 las principales ocupaciones en Durango fueron: empleados de ventas, despachadores y dependientes en comercios (50,800 personas); comerciantes en establecimientos (38,000); y albañiles, mamposteros y afines (27,400) (Secretaría de Economía, 2024).

Es un desafío para las instituciones de educación superior en México generar estrategias que permitan a sus egresados estar a la altura de las expectativas de los empleadores, en la era de la globalización.

Este estudio revela el nivel actual de desarrollo de las principales capacidades necesarias para el empleo y el emprendimiento, en los estudiantes de tercer y cuarto año, de los ocho planes de estudio de ingeniería del ITSL. Esta información permitirá al instituto el diseño de estrategias focalizadas en el fortalecimiento de las capacidades laborales que necesitan los estudiantes próximos a terminar sus estudios.

Mediante un análisis descriptivo de tipo cuantitativo se busca responder a la siguiente interrogante: ¿Qué competencias están presentes y en qué grado se manifiestan en los estudiantes del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo?

Psicotest© es una organización mexicana para el diseño, estandarización y aplicación de pruebas psicométricas laborales en línea. Su plataforma es utilizada por más de 15,000 reclutadores diariamente, y han evaluado a más de 7 millones de personas en 25 países (Psicotest, 2024)

Específicamente se consideran 14 competencias laborales medidas por la prueba psicométrica Competian® de Psicotest©: análisis de problemas, toma de decisiones, juicio, comunicación, liderazgo, delegación, desarrollo de colaboradores, trabajo en equipo, inteligencia emocional, tolerancia a la presión, actitud de servicio, seguimiento y control, planeación y organización y enfoque a resultados.

La prueba psicométrica Competian® se fundamenta en las teorías de competencias laborales de David McClelland (1973), quien señaló que los historiales académicos no bastan para predecir el éxito profesional; de Levy-Leboyer (1997), quien definió las competencias como comportamientos observables que permiten un desempeño eficaz y de Martha Alles (2016), quien identificó competencias clave como planeación, liderazgo, trabajo en equipo, comunicación, inteligencia emocional y enfoque a resultados. Los resultados de la prueba clasifican cada competencia en cinco niveles: Alto, Suficiente, Regular, Insuficiente y Bajo (Psicotest, 2025).

2. DESARROLLO

2.1 Metodología

La investigación realizada es de enfoque cuantitativo, el diseño es no experimental pues no se manipula deliberadamente ninguna variable y se analiza el fenómeno en su ambiente natural; es transversal pues los datos se recopilan en un único momento y no analiza cambios a través del tiempo; es de alcance descriptivo, su finalidad es especificar las

características importantes del fenómeno sin intentar establecer alguna correlación ni explicación entre sus variables; los estudios descriptivos "únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refiere, esto es, su objetivo no es indicar cómo se relacionan éstas" (Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p.92)

El interés de la investigación surge a que se identifica la brecha existente entre el desarrollo de las competencias en la formación profesional de estudiantes mexicanos y las competencias laborales de los egresados, requeridas por los empleadores. La población objeto de estudio son los estudiantes de ingeniería del ITSL; el momento de recopilación de datos es de mayo a julio de 2024.

El objetivo de la investigación es identificar el grado de competencias laborales que poseen los estudiantes, no tiene el propósito de confirmar hipótesis. Para un estudio descriptivo no es necesaria la formulación de una hipótesis, excepto si se quisiera predecir un hecho (Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p.104).

2.2. Instrumento de medición

Para la evaluación de las competencias laborales y personales de los participantes, se utilizó el instrumento COMPETIAN®, desarrollado por Psicotest©, el cual permite identificar el nivel de dominio en diferentes competencias clave vinculadas al desempeño profesional. Dicho instrumento se basa en 14 variables conductuales observables que reflejan las formas en que las personas actúan ante situaciones de trabajo concretas. Cada variable representa una característica medible del fenómeno de estudio y se clasifica en un rango porcentual de desempeño. "Alto" corresponde al intervalo 81-100%, "Suficiente" 61-80%, "Regular" 41-60% , "Insuficiente" 21-40% para finalizar con el "Bajo" 0-20%.

A continuación, se describen las competencias consideradas en el estudio, integrando su definición conceptual —formulada por el equipo investigador— y su definición operacional según la estructura de medición del instrumento.

El análisis de problemas es la capacidad de descomponer situaciones complejas para identificar causas y proponer soluciones objetivas. En COMPETIAN®, refleja pensamiento analítico y estructuración lógica; niveles bajos indican dificultad para jerarquizar información.

La toma de decisiones implica evaluar alternativas y elegir la más adecuada ante la incertidumbre. La prueba valora la anticipación, el pensamiento estratégico y la visión a largo plazo; los niveles bajos evidencian impulsividad y falta de planeación.

El juicio se relaciona con la evaluación racional de opciones y la selección de acciones según criterios objetivos. COMPETIAN® mide el pensamiento crítico y la precisión del análisis; niveles bajos reflejan inseguridad o lentitud al decidir.

La comunicación abarca la claridad para expresar ideas y la escucha activa. Niveles altos indican precisión y empatía; los bajos, dificultades para transmitir o comprender mensajes.

El liderazgo se define como la capacidad de influir y guiar hacia metas comunes, habilidad para inspirar y dirigir equipos; niveles bajos reflejan falta de orientación o reconocimiento.

La delegación consiste en asignar tareas y responsabilidades con autonomía. Se mide la confianza en el equipo y la eficiencia en la distribución del trabajo; niveles bajos muestran centralización o desconfianza.

El desarrollo de colaboradores evalúa el acompañamiento y promoción del crecimiento profesional. Niveles altos demuestran compromiso con la formación; los bajos, escasa atención al talento.

El trabajo en equipo implica colaborar y coordinar esfuerzos para alcanzar objetivos comunes. COMPETIAN® valora la cohesión y cooperación; niveles bajos reflejan aislamiento o dificultad de integración.

La inteligencia emocional mide la capacidad para reconocer y regular emociones propias y ajenas. Niveles altos indican empatía y autocontrol; los bajos, impulsividad o poca estabilidad emocional.

La tolerancia a la presión refleja la resiliencia ante situaciones de estrés. Niveles altos muestran control y persistencia; los bajos, deterioro del desempeño.

La actitud de servicio valora la disposición positiva para atender necesidades con empatía y eficacia. Niveles altos evidencian vocación de servicio; los bajos, desinterés o falta de compromiso.

El seguimiento y control mide la planificación, supervisión y corrección de procesos. Niveles altos reflejan orden y disciplina; los bajos, desorganización.

La planeación y organización evalúa la gestión del tiempo y los recursos para lograr metas. Niveles altos evidencian previsión y eficiencia; los bajos, desorden y falta de control.

Finalmente, el enfoque a resultados representa la orientación al logro y la mejora continua. Niveles altos reflejan compromiso y productividad; los bajos, pasividad o baja motivación.

En conjunto, las competencias evaluadas mediante el instrumento COMPETIAN® de Psicotest© proporcionan una visión integral del comportamiento laboral y del potencial de desempeño de las personas. Su análisis permite identificar las fortalezas y áreas de mejora relacionadas con la empleabilidad, el liderazgo y el desarrollo humano en entornos organizacionales.

2.3 Contexto de la Investigación

El ITSL está ubicado en la ciudad de Lerdo, Dgo. e inició sus actividades académicas en agosto de 1996. (Historia ITSL, 2022). Actualmente es un instituto descentralizado del TecNM, que ofrece a la comunidad estudiantil ocho licenciaturas en ingeniería, de las cuales dos: industrial y gestión empresarial, se ofrecen también en modalidad a distancia. En el semestre enero-junio de 2024, lapso de

recopilación de los datos, su población estudiantil en licenciatura en modalidad presencial era de 2254 estudiantes.

2.4 Población y Muestra

La población objeto de la investigación son los estudiantes inscritos en licenciatura en el sistema escolarizado presencial del ITSL.

La población es heterogénea, pues son alumnos inscritos en diversas carreras de ingeniería y cursando diferentes semestres; es finita pues se conoce con precisión el número de estudiantes inscritos en el periodo de recopilación de datos.

En el enfoque de investigación cuantitativo "la muestra es un subgrupo de la población de interés sobre el cual se recolectarán datos, y que tiene que definirse y delimitarse de antemano con precisión, además de que debe ser representativo de la población" Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p.173),

Para obtener el tamaño de la muestra para el nivel de confianza de 95% se utilizó la fórmula para el cálculo de muestras a partir de una población finita. El error máximo aceptable se define en un 5% (0.05) se refiere al "error potencial que admitimos como tolerancia de que nuestra muestra no sea representativa de la población" (Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p.179), como es la primera vez que se selecciona esta muestra se usan porcentajes estimados iguales del 50% (0.50) para p y q que son, respectivamente, la probabilidad de ocurrencia y de no ocurrencia del fenómeno.

Fórmula (1) para la determinación del tamaño de la muestra para una población finita y estimación de porcentajes, dado un error muestral.

$$n = \frac{(N*Z^2*p*q)}{(N-1)*e^2 + Z^2*p*q} \qquad (1)$$

Fuente: López-Roldán y Fachelli (2015)

Con los parámetros N=2254; Z=1.96; p,q=0.5; e=0.05, el resultado del cálculo es de 328.34, que se ajusta a 329.
El muestreo estratificado es adecuado cuando la población está dividida en grupos con diferentes características, pues refleja las particularidades de los subgrupos de la población; se seleccionó este tipo de muestreo ya que en la población existen grupos heterogéneos y estos, identificados como estratos, tienen homogeneidad en sus elementos pues pertenecen a una licenciatura en ingeniería modalidad presencial, en el mismo instituto tecnológico. Para la selección de los elementos representantes de cada estrato se utiliza el método de muestreo aleatorio o al azar.
En este estudio, los estratos son las carreras profesionales del ITSL y cada estrato queda representado en la muestra en proporción a su frecuencia en la población total. En la tabla 1 se muestran la población y el cálculo de la muestra proporcional para cada estrato.

Tabla 1. Muestra calculada por especialidad.

Especialidad de Ingeniería	Población	Muestra calculada
Ambiental	66	9.63
Electromecánica	239	34.89
Electrónica	129	18.83
Industrial	820	119.69
Informática	70	10.22
Gestión Empresarial	406	59.26
Sistemas Automotrices	202	29.48
Sistemas Computacionales	322	47
Total	2254	329

Los estratos son homogéneos pues los criterios de inclusión son que los estudiantes pertenezcan al sistema escolarizado presencial en nivel licenciatura y que estén inscritos en el 5° semestre o posterior en alguna de las carreras mencionadas. Después del cálculo de la muestra esperada para cada estrato, se procede a la selección de los grupos al azar y a la aplicación en línea del instrumento de recolección de datos COMPETIAN© de PsicoTest®. El instrumento mencionado se aplica a un poco más de 400 estudiantes que cumplen con los criterios de inclusión, en los meses de mayo, junio y julio de 2024.
En total se recolectaron datos de 388 casos válidos, superando en 59 el tamaño mínimo calculado para la muestra, en la figura 1 se representa la distribución final por estrato.

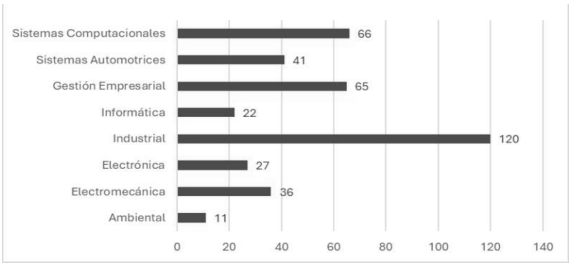


Figura 1. Distribución final de la muestra por especialidad

Uno de los criterios para categorizar la muestra es el semestre al que pertenecen los estudiantes. Las cifras resultantes se incluyen en la tabla 2.

Tabla 2. Frecuencia por semestre

Semestre	Frecuencia
5°	61
6°	135
7°	63
8°	113
9°	16
Total	388

La prueba mide el nivel de desarrollo de cada competencia en un rango de 0 a 100 y lo categoriza en cinco niveles: alto, suficiente, regular, insuficiente y bajo.

Las calificaciones obtenidas por cada estudiante en la prueba, para cada una de las 14 competencias, se capturaron en una hoja de cálculo de Excel 2024, y se importaron al software estadístico Statistica versión 10, para su análisis estadístico descriptivo univariante.
El análisis descriptivo univariante se centra en la examinación de una característica única, se realiza mediante la agrupación de las variables simples y permite obtener las características presentes de forma sobresaliente, normal y deficiente, en el fenómeno de estudio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para llevar a cabo el análisis univariante se examinan las medidas de tendencia central y de dispersión. Las puntuaciones obtenidas se ordenan según la media de mayor a menor valor y se calculan los límites superior e inferior con el siguiente criterio: las variables cuya media sea superior a la media de medias más una desviación estándar pertenecen al límite superior; aquellas cuya media sea inferior a la media de medias menos una desviación estándar, corresponden al límite inferior y las variables que encajan en el rango del promedio de las medias +/- una desviación estándar, forman parte de la normalidad. La media de medias tiene un valor de 50.69 y la desviación estándar de las medias es de 4.54, con lo que el límite superior se ubica en el valor de 55.23 y el límite inferior en 46.16. En la tabla 3 se muestran las abreviaturas de las variables empleadas y su significado.

Tabla 3. Significado de los nombres de las variables empleadas en el análisis estadístico

Abreviatura	Significado (Competencia en…)
Plan_Org	Planeación y organización
Análisis	Análisis de problemas
Comuni	Comunicación
Seg_ctrl	Seguimiento y control
Lidera	Liderazgo
Delega	Delegación
Intel_Em	Inteligencia emocional
Juicio	Juicio
Act_Serv	Actitud de servicio
Tolera_P	Tolerancia a la presión
Trab_eq	Trabajo en equipo
Resulta	Enfoque a resultados
Des_Col	Desarrollo de colaboradores
Toma_D	Toma de decisiones

La tabla 4 muestra las variables ordenadas según la media, en orden descendente, se incluyen los valores de la mediana, moda, frecuencia, valores mínimos y máximos.

Tabla 4. Estadística descriptiva.

Variable	Media	Mediana	Moda	Frec	Mn	Mx
Plan_Org	58.91	60.00	60	50	5	100
Análisis	57.50	60.00	70	34	12	100
Comuni	55.60	55.00	42	53	18	100
Seg_ctrl	52.92	55.00	60	35	5	100
Lidera	52.58	55.00	60	54	5	100
Delega	52.46	58.00	62	48	5	100
Intel_Em	49.53	50.00	60	51	16	98
Juicio	48.87	43.50	60	36	5	100
Act_Serv	48.78	45.00	50	38	5	100
Tolera_P	48.45	50.00	55	40	12	100
Trab_eq	48.28	45.00	45	60	16	100
Resulta	47.59	45.00	55	49	16	100
Des_Col	45.32	45.00	42	30	0	100
Toma_D	42.94	40.00	45	55	5	100

3.1 Lectura Estadística.

En la mayoría de los casos la respuesta mínima a las variables fue de 5, excepto en Des_Col qué fue de 0; mientras que, en la mayoría, la respuesta máxima fue de 100, excepto en Intel_Em, con valor máximo de 98, por lo que se cubren todos los valores de la escala.
Por encima del límite superior se ubican las competencias que son significativas en mayor grado para los respondientes. Aquí se encuentran las variables que representan las competencias en planeación y organización, análisis de problemas y comunicación.
Los estudiantes están muy de acuerdo en que son capaces de establecer objetivos y plazos para la realización de las tareas, definir prioridades y verificar que se han realizado las actividades previstas; analizar problemas, organizar y presentar datos numéricos y tener la capacidad de hacer preguntas constructivas e interesarse por los puntos de vista de los demás.
En el límite inferior se ubican las variables que son menos significativas para los encuestados; los estudiantes poseen en menor grado las competencias para el desarrollo de los colaboradores y para la toma de decisiones: expresan desacuerdo en cómo compartir las experiencias con sus colaboradores y cómo retroalimentar y alentar al equipo; no se anticipan a situaciones que pueden surgir y tienen diferentes enfoques para abordar los problemas potenciales.
Las competencias para el seguimiento y control, liderazgo, delegación, inteligencia emocional, juicio, actitud de servicio, tolerancia a la presión, trabajo en equipo y enfoque a resultados se ubicaron en el rango de la media +/- una desviación estándar, por lo que su comportamiento se considera normal; los estudiantes en común poseen un cierto grado de desarrollo de estas competencias.
"La mediana es una medida tanto de centralidad como de localización, puesto que nos indica el valor por debajo del cual tenemos ubicado el 50 por ciento de observaciones de una distribución ordenada" (Mas, 2019). Considerando los valores obtenidos para las medianas, en la tabla 5 se observa que, para las competencias de planeación y organización y análisis de problemas, la mitad de los casos están por debajo de la puntuación de 60; en la competencia de comunicación, el 50% de las observaciones son inferiores a 55. El valor más bajo para la mediana corresponde a la competencia de toma de decisiones, con la mitad de los casos por debajo de 40.

3.2 Lectura Inferencial.

Los resultados de los 388 estudiantes se sitúan entre el 40% y el 60%, lo que indica un desempeño "regular". Esto sugiere que poseen una capacidad intermedia en cada una de las

competencias evaluadas. La categoría “regular” refleja que, aunque los respondientes poseen las habilidades necesarias para responder a las exigencias de las diferentes áreas evaluadas, la combinación de sus actitudes, conocimientos y habilidades no son suficientes para tener un buen desempeño.
Es importante destacar que existen diferencias significativas en el desempeño de los estudiantes dentro de este mismo rango; como se muestra en la tabla 5, si bien las competencias más sobresalientes en los estudiantes: planeación organizacional, análisis de problemas y comunicación, se ubican en el rango "regular", les faltan pocos puntos para alcanzar el nivel de "suficiente". Por otro lado, las competencias de desarrollo de colaboradores y toma de decisiones, más deficientes en los encuestados, también permanecen en la categoría de “regular”
En cuanto a las competencias requeridas por las empresas, medidas en este cuestionario, se incluyen: comunicación, trabajo en equipo y liderazgo, todas ellas clasificadas en el rango "regular" en los resultados. A continuación, se interpretan los resultados de cada competencia evaluada, con base en las definiciones establecidas por la prueba COMPETIAN©.

3.3 Competencias en el límite superior
Las competencias con puntajes más altos se sitúan cerca del umbral del nivel "suficiente", pero aún no lo alcanzan. Entre ellas destacan:

1. Planeación y organización: Los estudiantes demuestran una capacidad moderada para organizar y planificar tareas. Aunque son capaces de establecer objetivos claros y definir prioridades, su capacidad de planificación es limitada cuando se trata de gestionar tareas complejas o de largo plazo. Necesitan mejorar en la organización del trabajo y en la anticipación de posibles problemas o contingencias.
2. Análisis de problemas: Los estudiantes tienen un nivel aceptable de análisis y resolución de problemas, pero no logran un nivel destacado. Aún deben desarrollar una mayor profundidad en la interpretación de datos y la capacidad de realizar conexiones más complejas.
3. Comunicación: Se comunican de manera clara y comprensible en situaciones simples, pero no logran una capacidad de expresión completamente efectiva. Aunque los estudiantes escuchan y se interesan por los puntos de vista de los demás, aún tienen margen de mejora en la forma en que transmiten sus propios mensajes. Sus habilidades para formular preguntas perspicaces o dar retroalimentación precisa aún no están del todo desarrolladas, lo que limita su efectividad en contextos colaborativos.

Aunque estas tres competencias están cerca del nivel "Suficiente", aún es necesario fortalecer ciertos aspectos para que los estudiantes puedan consolidarse en un desempeño más eficiente. Un impulso en estas áreas podría elevar significativamente el desempeño general.

3.4 Competencias en el límite inferior
Por otro lado, las competencias con menos nivel de significancia revelan debilidades más profundas en los estudiantes, lo que sugiere la necesidad de intervenciones. Las competencias en este nivel son:

4. Desarrollo de colaboradores: Si bien los estudiantes pueden fomentar una colaboración básica y proporcionar retroalimentación ocasional, no desempeñan un papel significativo en el crecimiento o desarrollo profesional de sus compañeros. No ofrecen suficiente apoyo ni orientación para mejorar el rendimiento del equipo de manera continua. Esta competencia refleja que los estudiantes tienen algunas dificultades para guiar y apoyar a sus compañeros en su crecimiento profesional, lo que limita su capacidad para trabajar en entornos colaborativos y de liderazgo.
5. Toma de decisiones: Los estudiantes tienden a tomar decisiones de manera rápida en situaciones de crisis, aunque lo hacen sin realizar un análisis exhaustivo de las circunstancias o considerar las consecuencias a largo plazo. Este resultado sugiere que la mayoría de los estudiantes actúan de manera reactiva y sin un análisis profundo de las consecuencias a largo plazo, lo que podría afectar su desempeño en escenarios más exigentes y complejos.

Estas dos competencias en el límite inferior indican áreas de mejora. La falta de habilidades en la toma de decisiones y en el desarrollo de los colaboradores tiene un impacto directo en la capacidad de los estudiantes para desempeñarse eficazmente en roles de liderazgo o en entornos empresariales.

3.5 Competencias requeridas por las empresas
Es importante señalar que algunas de las competencias más demandadas por las empresas también se encuentran en el rango de regular, lo cual exige un mayor énfasis en su desarrollo académico:

1. Comunicación. Como ya se ha mencionado, los estudiantes están cerca de un nivel suficiente, pero deben mejorar en la precisión y la capacidad para expresar ideas de manera más clara y efectiva.
2. Trabajo en equipo. Los estudiantes pueden colaborar en equipo, solicitar opiniones y mantener una actitud abierta, pero carecen de habilidades para promover un entorno de cooperación y no logran consolidar un ambiente de trabajo cohesionado que facilite la resolución de conflictos y el logro de objetivos compartidos.
3. Liderazgo. Los estudiantes son capaces de fijar algunos objetivos que son aceptados por el grupo, pero carecen de las habilidades necesarias para inspirar a otros o para guiar a su equipo hacia metas más ambiciosas. Si bien pueden realizar un seguimiento adecuado de las tareas, no logran integrar de manera efectiva las opiniones de los demás en el proceso.

3.6 Competencias en la normalidad
Estas competencias son las que los estudiantes presentan como parte de su normalidad y también se categorizan en un nivel regular.

1. Juicio: Evalúan las situaciones de manera superficial, concentrándose en lo que conocen, sin explorar otros escenarios o posibles implicaciones que podrían tener un

mayor impacto en las decisiones empresariales o personales. Sus prioridades están alineadas con lo que consideran inmediato, pero sin una visión estratégica.

2. Delegación: Se les dificulta asignar responsabilidades de manera clara y eficiente; lo que impide un aprovechamiento óptimo de los talentos individuales dentro de un equipo. Aunque pueden asignar algunas tareas, no logran transmitir claramente los objetivos ni aprovechar completamente el potencial del grupo.
3. Inteligencia emocional: Los estudiantes logran mantener el control de sus emociones en situaciones de estrés o conflicto, aunque en muchos casos esto se limita a no reaccionar de manera impulsiva. Pero no son capaces de utilizar sus emociones de forma constructiva para motivarse a sí mismos o a otros en momentos difíciles.
4. Tolerancia a la presión: Aunque son capaces de alcanzar los objetivos bajo presión, su rendimiento en situaciones altamente exigentes o con plazos ajustados es notablemente inferior al que podrían alcanzar en condiciones más controladas. Su capacidad para manejar imprevistos o desacuerdos sin que su desempeño se vea afectado es limitada.
5. Actitud de servicio: Mantienen una actitud de disponibilidad hacia el cliente y son capaces de responder a sus expectativas inmediatas; sin embargo, no demuestran una disposición proactiva para superar esas expectativas o para anticiparse a las necesidades no expresadas de los clientes. Su enfoque es más reactivo que proactivo en este aspecto.
6. Seguimiento y control: Realizan un seguimiento básico del trabajo asignado, pero no se preocupan lo suficiente por verificar la calidad de las tareas o por asegurarse de que los procedimientos se sigan de manera rigurosa. Hay un cumplimiento de las normas, pero sin un esfuerzo adicional por optimizar los procesos.
7. Enfoque a resultados: Aunque muestran una intención de mejorar la calidad y eficiencia de su trabajo, las acciones que emprenden para lograrlo son limitadas; no tienen la iniciativa suficiente para realizar cambios significativos en los métodos de trabajo que permitan un mayor avance hacia resultados superiores.

4. CONCLUSIONES

El hecho de que los 388 estudiantes hayan obtenido resultados clasificados en la categoría de desempeño regular sugiere que, si bien poseen las competencias necesarias para ejecutar tareas de manera funcional, dichas competencias no están lo suficientemente desarrolladas como para permitir un desempeño laboral sobresaliente. Los estudiantes cumplen con los requisitos básicos, pero carecen de la proactividad, profundidad y eficacia requeridas para destacar en entornos más desafiantes o competitivos. El análisis refleja que, aunque competencias como la planeación y organización, el análisis de problemas y la comunicación están presentes en los estudiantes, su nivel de desarrollo no resulta suficiente para destacar en el ámbito profesional. Por otro lado, las competencias relacionadas con el desarrollo de colaboradores y la toma de decisiones evidencian una carencia de habilidades esenciales para el éxito en roles de liderazgo y colaboración en entornos empresariales. Aún con estos resultados, se observa una cierta congruencia entre las habilidades adquiridas por los estudiantes que han completado al menos la mitad de su formación profesional y el perfil de competencias esperado en un profesionista egresado.

Para elevar el nivel de estas competencias, se sugieren las siguientes estrategias:

- Mejorar la toma de decisiones: implementar simulaciones de escenarios empresariales donde los estudiantes deban tomar decisiones estratégicas, evaluando riesgos y consecuencias a largo plazo.
- Fomentar el desarrollo de colaboradores: crear programas de mentoría entre pares, donde los estudiantes puedan practicar la retroalimentación constructiva y el apoyo mutuo en el crecimiento profesional.
- Fortalecer la comunicación y el trabajo en equipo: incluir más actividades de debate, presentaciones grupales y dinámicas de resolución de conflictos que permitan a los estudiantes mejorar sus habilidades para colaborar eficazmente y expresar sus ideas con mayor claridad.
- Desarrollar habilidades de liderazgo: asignar roles de liderazgo en proyectos colaborativos, brindando a los estudiantes la oportunidad de establecer objetivos, guiar a sus compañeros y evaluar el progreso del equipo.
- Desarrollar la toma de decisiones estratégicas: se sugiere ofrecer más oportunidades para que los estudiantes practiquen la toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre, con un enfoque a largo plazo.
- Fomentar la inteligencia emocional y la resiliencia: incorporar entrenamientos y actividades que refuercen la gestión de las emociones de manera más efectiva, especialmente en situaciones de alta presión. Esto les permitirá responder de manera más constructiva ante el estrés y las dificultades.
- Impulsar un enfoque más fuerte hacia la obtención de resultados: es crucial establecer metas más desafiantes y proporcionar a los estudiantes las herramientas necesarias para que superen sus propios estándares. Esto incluiría el uso de indicadores de desempeño y la promoción de la mejora continua a través de cambios específicos en los métodos de trabajo.
- Fortalecer las habilidades de análisis y resolución de problemas: se recomienda implementar actividades más complejas que desafíen a los estudiantes a profundizar en el análisis de problemas y a desarrollar soluciones innovadoras. Esto fomentará un enfoque más crítico y estratégico.

Estos resultados y recomendaciones tienen el potencial de contribuir a que el Tecnológico Nacional de México adopte estrategias efectivas que favorezcan el desarrollo de las competencias laborales dentro de la formación académica de sus estudiantes, permitiéndoles así responder a las expectativas de la sociedad en el contexto de la globalización.

Las competencias laborales trascienden las habilidades técnicas del egresado. En palabras de Machado y Montes de Oca (2020) son “un saber hacer complejo, resultado de la integración, movilización y adecuación de procesos variados y esenciales en un contexto, que comprende la adquisición del contenido de aprendizaje, para lo cual se ponen de manifiesto

otras muchas dimensiones". En la revisión de la literatura se destaca que los empleadores valoran especialmente las habilidades "blandas", como el liderazgo y la comunicación. La implementación de las estrategias propuestas puede fortalecer la formación integral de los estudiantes, lo que podría traducirse en un mejor desempeño tanto en el ámbito laboral como en el emprendimiento.

5. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La réplica de este estudio en diversos planteles del Tecnológico Nacional de México podría aportar evidencia valiosa sobre el nivel de competencias laborales que poseen los estudiantes y permitiría realizar comparaciones entre distintas carreras y grupos de edad, para la identificación de las diferencias y áreas de oportunidad. Los resultados derivados de ese análisis podrían servir de base para el diseño e implementación de programas de formación orientados al fortalecimiento de las competencias más demandadas por los empleadores.

REFERENCIAS

Alles, M. (2016) Diccionario de competencias: La Trilogía, Vol. 1. Las 60 competencias más utilizadas en gestión por competencias. Nueva edición. Buenos Aires: Ediciones Granica.

Hernández, S.R., Fernández, C.C. y Baptista, L.M.P. (2014) Metodología de la investigación. 6ª ed. México: McGraw Hill Education.

Instituto Tecnológico Superior de Lerdo (ITSL). (2022) Historia ITSL. Disponible en: https://www.lerdo.tecnm.mx/institucion/historia (Accedido: 8 octubre 2025).

López-Roldán, P. y Fachelli, S. (2015) Metodología de la investigación social cuantitativa. Universitat Autònoma de Barcelona. Disponible en: https://ddd.uab.cat/pub/caplli/2015/142929/metinvsocc ua_cap3-12a2015.pdf (Accedido: 8 octubre 2025).

Levy-Leboyer, C. y Prieto, J.M. (1997) Gestión de las competencias. Madrid: Ediciones Gestión 2000.

McClelland, D.C. (1973) "Testing for competence rather than for intelligence", American Psychologist, 28(1), pp. 1–14. Disponible en: https://www.therapiebreve.be/documents/mcclelland-1973.pdf (Accedido: 8 octubre 2025).

Machado Ramírez, E.F. y Montes de Oca Recio, N. (2020) 'Competencias, currículo y aprendizaje en la universidad. Motivos para un debate: Antecedentes y discusiones conceptuales', Transformación, 16(1), pp. 1–13. Disponible en: http://scielo.sld.cu/pdf/trf/v16n1/2077-2955-trf-16-01-1.pdf (Accedido: 8 octubre 2025).

Mas, E.J. (2019) Análisis univariante (PID_00268326). Universitat Oberta de Catalunya. Disponible en: https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/148455/3/AnalisisUnivariante.pdf (Accedido: 8 octubre 2025).

Psicotest (2024) Acerca de nosotros. Disponible en: https://psicotest.mx/nosotros/ (Accedido: 8 octubre 2025).

Psicotest (2025) Prueba Psicométrica COMPETIAN®. Disponible en: https://psicotestqa.com/n_landing/docs/validez_competian_pdf/competian_validez_y_confianza.pdf (Accedido: 8 octubre 2025).

Secretaría de Economía. (2024) Data México. Durango. Disponible en: https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/durango-dg (Accedido: 8 octubre 2025).

Universidad del Valle de México (UVM). (2023) Encuesta Nacional de Egresados 2023. Centro de Opinión Pública. Disponible en: https://opinionpublica.uvm.mx/estudios/encuesta-nacional-de-egresados-2023/ (Accedido: 8 octubre 2025).

Universidad del Valle de México (UVM). (2022) Encuesta Nacional de Egresados 2022. Centro de Opinión Pública. Disponible en: https://opinionpublica.uvm.mx/estudios/encuesta-nacional-de-egresados-2022/ (Accedido: 8 octubre 2025).

Vargas Zúniga, F. (2004) 40 preguntas sobre competencia laboral. Vol. 13. Montevideo: CINTERFOR/OIT. Disponible en: https://www.oitcinterfor.org/sites/default/files/file_publicacion/40preg_web.pdf (Accedido: 8 octubre 2025).

Western Michigan University. (2024) Skills Employers Want in College Graduates. Disponible en: https://wmich.edu/career/students/transferableskills (Accedido: 8 octubre 2025).

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Photocatalytic performance of sol–gel synthesized ZnO in methylene blue degradation under direct photocatalysis and photo-Fenton-like conditions

Cruz Ortiz, Areli Adamary*. Salinas Angon, Maximiliano*. Cruz Santiago, Lorenzo Antonio*. Martinez Velazquez, Jennifer Valeria. Portales Martínez, Benjamín**.**

** Tecnológico Nacional de México/TES de Cuautitlán Izcalli, Av. Nopaltepec s/n Fracción la Coyotera del Ejido San Antonio Cuamatla, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, 54748, México.*
e-mail: {203142070, 203142062, lorenzo.cs}@cuautitlan.tecnm.mx
*** Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, Legaria 694. Colonia Irrigación, 11500 CDMX*
e-mail: jmartinezv2407@alumno.ipn.mx , bportalesm@ipn.mx

Abstract: In this study, zinc oxide (ZnO) was synthesized via the sol–gel method to evaluate its efficiency in degrading organic pollutants through hydroxyl radical (•OH) generation, a key mechanism in Advanced Oxidation Processes (AOPs). Hydroxyl radicals, known for their high reactivity in aqueous media, were applied to the degradation of methylene blue (MB). ZnO, an n-type semiconductor, was selected due to its high photocatalytic activity, low cost, and low toxicity, making it attractive for industrial wastewater treatment. The synthesized catalysts were characterized by FTIR-ATR, TGA, and UV–Vis spectroscopy. TGA analysis was used to determine the optimal calcination temperature and residence time. Six ZnO samples were prepared under thermal treatments at 400 and 500 °C with residence times of 1, 2, and 3 hours. For each catalyst, the band gap, reaction order, and kinetic constant were determined. Photocatalytic degradation tests were performed under both direct photocatalysis and photo-Fenton-like conditions, enabling comparative analysis. MB degradation was monitored through absorbance measurements, and degradation efficiencies were quantified by spectral intensity at 30-minute intervals.

Keywords: Zinc oxide, degradation, organic pollutants, advanced oxidation processes, semiconductors, photocatalyst and photo-Fenton process.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los procesos de oxidación avanzada (POA) representan una de las estrategias más eficaces para la degradación de contaminantes orgánicos recalcitrantes, cuya estabilidad química impide su eliminación mediante métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales (Zaruma et al., 2018; Dewil et al., 2017). Dentro de estos procesos, el uso de materiales con alta actividad fotocatalítica resulta fundamental para incrementar la eficiencia de degradación.

En este contexto, el óxido de zinc (ZnO) ha despertado gran interés debido a su carácter de semiconductor tipo n, alta actividad fotocatalítica, baja toxicidad y bajo costo de producción, lo que lo convierte en un candidato atractivo para aplicaciones ambientales. Su capacidad para generar radicales hidroxilos (•OH) bajo irradiación lo hace particularmente útil en la mineralización de contaminantes persistentes, transformándolos en compuestos inocuos como CO_2 y H_2O (Gligorovski et al., 2015; Cheng et al., 2016; Pandis et al., 2022).

Asimismo, la incorporación de agentes oxidantes como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) puede potenciar estos procesos a través de mecanismos tipo Fenton o foto-Fenton, incrementando la formación de especies altamente oxidantes y, por consiguiente, la eficiencia global de degradación (Bokare & Choi, 2014; Vaitsis et al., 2020).

Diversos estudios han reportado que las propiedades estructurales y ópticas del ZnO dependen fuertemente de las condiciones de síntesis y del tratamiento térmico, lo que influye directamente en su brecha de banda, dinámica de portadores de carga y desempeño fotocatalítico (Santiago et al., 2022). Entre los métodos de síntesis, el sol–gel ofrece ventajas significativas como control en la morfología, pureza y homogeneidad de las partículas, siendo ampliamente empleado para el diseño de nanomateriales fotocatalíticos. Sin embargo, aún es necesario optimizar los parámetros de calcinación —temperatura y tiempo de residencia— para maximizar la eficiencia de este material en procesos de oxidación avanzada.

Por otro lado, el azul de metileno (AM) se utiliza como molécula modelo para evaluar la eficiencia en la degradación de colorantes orgánicos a través del uso de materiales fotocatalíticos, como el ZnO. El AM tiene una alta solubilidad en agua, estabilidad estructural y marcada absorbancia en la región visible, lo que permite un seguimiento preciso de su degradación mediante espectrofotometría UV–Vis (Atta et al., 2024). Su uso bajo condiciones fotocatalíticas directas y de tipo Fenton permite comparar la eficiencia del semiconductor y analizar la posible sinergia entre la actividad fotoinducida del ZnO y las reacciones de oxidación promovidas por el H_2O_2 (Aina et al., 2025).Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue sintetizar ZnO mediante el método sol–gel, evaluar el efecto del tratamiento térmico y del tiempo de residencia en sus propiedades estructurales y ópticas, y analizar su desempeño fotocatalítico en la degradación del azul de metileno bajo condiciones de fotocatálisis directa y tipo foto-Fenton. Los materiales obtenidos fueron caracterizados

mediante espectroscopía infrarroja (FTIR-ATR), análisis termogravimétrico (TGA), difracción de rayos X (DRX) y espectroscopía UV–Vis por reflectancia difusa (DRS).

1.1 Materiales y métodos

- Síntesis de ZnO por el método sol–gel

Para la preparación de 1 g de óxido de zinc (ZnO), se disolvió ácido cítrico ($C_6H_8O_7$) en agua destilada para obtener una solución 0.62 M (10 mL). De manera análoga, se preparó una solución 1.24 M de nitrato de zinc hexahidratado ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) en 10 mL de agua destilada.

Ambos precursores se pesaron y mezclaron en el mismo crisol con el fin de minimizar pérdidas de material y facilitar el proceso de secado y posterior tratamiento térmico. La mezcla se agitó en una parrilla magnética durante 10 min para asegurar la homogeneización.

El gel obtenido se sometió a un proceso de secado en un equipo deshidratador a 70 °C durante 48 h. Posteriormente, se realizaron seis síntesis variando los tiempos de tratamiento térmico, con el objetivo de identificar las condiciones más favorables para obtener materiales con mayor actividad fotocatalítica. Las variaciones de temperatura y tiempo empleadas en cada síntesis se resumen en la Tabla 1, mientras que la Figura 1 presenta esquemáticamente el procedimiento seguido para la muestra ZB01.

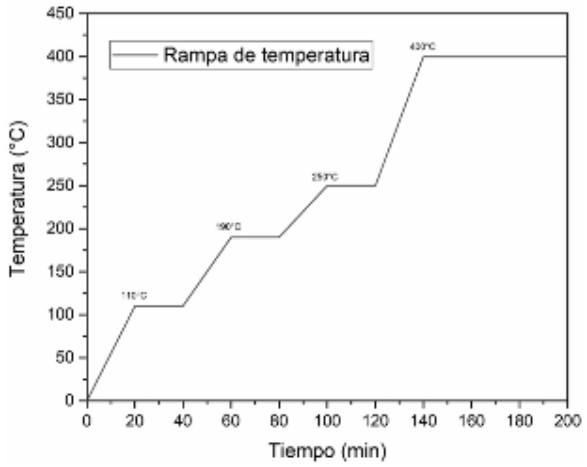


Figura 1. Rampas de calentamiento y temperaturas de tratamiento térmico para la muestra ZB01.

Posterior a los tratamientos térmicos, las muestras se pasaron por un mortero para reducir al máximo el tamaño de partícula permitiendo almacenarlas para pruebas de caracterización y degradación, estudiando sus propiedades y evaluando las diferencias al modificar los tiempos de tratamiento térmico.

2. ANÁLISIS DE MUESTRAS

Las muestras se caracterizaron como se describe a continuación: Las mediciones de TGA se realizaron en un equipo IR TGA Q5000 (de TA Instruments) a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, de 50 °C a 850 °C bajo flujo de aire. Los análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier se registraron en un espectrómetro PerkinElmer, utilizando un accesorio ATR en el rango de 4000 a 400 cm^{-1}. La cristalinidad y la formación de fases de las muestras se obtuvieron mediante difractogramas de rayos X utilizando un instrumento Bruker D8 Advance mediante radiación de Cu (40 kV, 20 mA) a temperatura ambiente en un rango angular de 20 °C/80 °C/2 °C.

Tabla 1. Datos resumidos de las diferentes rampas de tratamientos térmicos para cada una de las muestras.

Muestra	Rampa de temperatura (°C)	Temperatura de tratamiento térmico final (°C)	Tiempo de tratamiento térmico final (h)
ZB01	0-110°C (5°C/min) 110°C (20 min) 110-190°C (5°C/min) 190°C (20 min) 190-250°C (5°C/min) 250°C (20 min) 250-400°C (10°C/min)	400	1
ZB02	0-110°C (5°C/min) 110°C (20 min) 110-190°C(5°C/min) 190°C (20 min) 190-250°C(5°C/min) 250°C (20 min) 250-400°C (10°C/min)	400	2
ZB03	0-100°C (5°C/min) 100°C (60 min) 100-200°C (5°C/min) 200°C (60 min) 200-300°C (5°C/min) 300°C (60 min) 300-400°C (10°C/min)	400	3
ZB04	0-110°C (5°C/min) 110°C (20 min) 110-190°C (5°C/min) 190°C (20 min) 190-250°C (5°C/min) 250°C (20 min) 250-400°C (10°C/min) 400°C (20 min) 400-500°C (10°C/min)	500	1
ZB05	0-100°C (5°C/min) 100°C (15 min) 100-200°C (5°C/min) 200°C (15 min) 200-300°C (5°C/min) 300°C (15 min) 300-400°C (5°C/min) 400°C (15 min) 400-500°C (10°C/min)	500	2
ZB06	0-110°C (5°C/min) 110°C (20 min) 110-190°C (5°C/min) 190°C (20 min) 190-250°C (5°C/min) 250°C (20 min) 250-400°C (5°C/min) 400°C (20 min) 400-500°C (10°C/min)	500	3

La espectrometría de reflectancia difusa (DRS) y la absorbancia en UV-Vis se obtuvieron utilizando un espectrofotómetro UV-Vis Thermo Scientific Evolution 220 equipado con una esfera integradora, en el rango de 200 a 800 nm con una resolución de 2.0 nm. Los experimentos de

fotodegradación se llevaron a cabo en una cámara oscura equipada con una parrilla de agitación magnética y una lámpara UV-C de 6 W (λ = 258 nm), la cual proporcionó la radiación necesaria para activar el proceso fotocatalítico.

2.1 Elaboración de la curva de calibración para pruebas de degradación.

Para poder realizar las pruebas de degradación de cada uno de los materiales se construyó previamente una curva de calibración teniendo como parámetro principal la absorbancia de cada alícuota, por lo que se usó un equipo UV-Vis Thermo Scientific Evolution 220 con una configuración de análisis de 200 a 800 nanómetros de longitud de onda. Se preparó una solución madre de 50 µM de azul de metileno (AM), partiendo de esta solución se hicieron disoluciones de 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 µM para medir la absorbancia de cada una de estas.

2.2 Construcción de cámara oscura para pruebas fotocatalíticas

La cámara oscura fue equipada con una parrilla eléctrica de agitación magnética junto con una lámpara de luz UV C de 6W (λ = 258 nm) y un termopar para monitorear la temperatura en todo el proceso de degradación, como se muestra en la Figura 2. La parrilla de agitación magnética se configuró a 600 rpm en intervalos de 30 minutos.

Figura 2. Cámara oscura para pruebas de degradación.

2.3 Pruebas de degradación del Azul de Metileno

Se prepara una solución de 30 µM de AM en 250 ml de agua destilada, posteriormente se vierte en un vaso de precipitado en donde se le añade 0.10 g de catalizador ZnO. La solución se introduce en la cámara oscura sin luz UV, con agitación magnética a 600 rpm durante 30 minutos, con el fin de alcanzar el equilibrio. De este periodo se realiza una medición en un equipo UV-Vis Thermo Scientific Evolution 220 para registrar la concentración inicial. Una vez alcanzado el equilibrio, la mezcla se somete nuevamente a la cámara oscura, exponiéndola a radiación UV durante dos horas tomando una alícuota de 5 ml por cada 30 minutos; esta muestra se centrifuga a 4500 rpm durante 6 minutos. De cada alícuota se toman 2.5 ml de solución, evitando extraer catalizador para evitar alteraciones en la medición de absorbancia. Con el fin de potencializar la actividad fotocatalítica de los materiales, se realizó un proceso tipo Fenton. Anteriormente, se determinó la cantidad óptima de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) para auxiliar al catalizador fomentando la producción de radicales hidroxilos (•OH), permitiendo que actúen en conjunto. Para este proceso Fenton se agregaron 20 µL de H_2O_2 a la solución 30 µM de AM en 250 ml con 0.10 g de catalizador ZnO, esperando obtener un mayor porcentaje de degradación. El esquema de la metodología empleada que muestra el paso a paso de las pruebas de degradación de AM se presenta en la Figura 3.

Figura 3. Metodología experimental empleada en las pruebas de degradación del AM.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización física y química

- Análisis Termogravimétrico (TGA)

Una vez mezclados los reactivos bajo agitación constante y transformada la mezcla de reacción en un xerogel, se llevó a cabo un análisis termogravimétrico (TGA) con el fin de determinar el tratamiento térmico más adecuado para la formación del óxido de zinc.

Las mediciones se efectuaron utilizando un equipo TGA Q5000 IR (TA Instruments) en un rango de temperatura de 50 a 850 °C. El análisis permitió identificar cuatro zonas de pérdida de masa e la figura 4, correspondientes a distintos procesos de descomposición del xerogel: la primera, con un 13,3 % de pérdida de masa, se atribuyó al agua fisisorbida hasta 110 °C; la segunda, con un 33,5 % de pérdida, correspondió al agua quimisorbida hasta 187 °C; la tercera, con un 16 %, se asoció a la descomposición parcial del ácido cítrico hasta 244 °C; y la cuarta, con un 15,6 %, se relacionó con la liberación de grupos nitrato del precursor de zinc y la descomposición total del ácido cítrico hasta 500 °C. Estos resultados permitieron establecer la temperatura óptima de calcinación para la obtención de ZnO, asegurando la formación de la fase cristalina deseada y la eliminación de los residuos orgánicos presentes en el xerogel.

- Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

El análisis FTIR de muestras de xerogel, ZB03 se muestra en la Figura. 5. Se llevó a cabo la caracterización del xerogel de ZnO por espectroscopía infrarroja posterior al secado con la finalidad de identificar los principales grupos funcionales y enlaces que presentan las síntesis previas al tratamiento térmico a 400°C y 500°C.

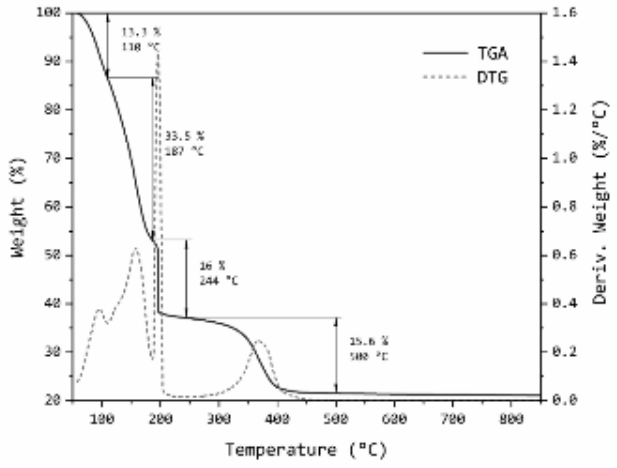


Figura 4. Análisis Termogravimétrico del xerogel de ZnO sintetizado por el método sol-gel.

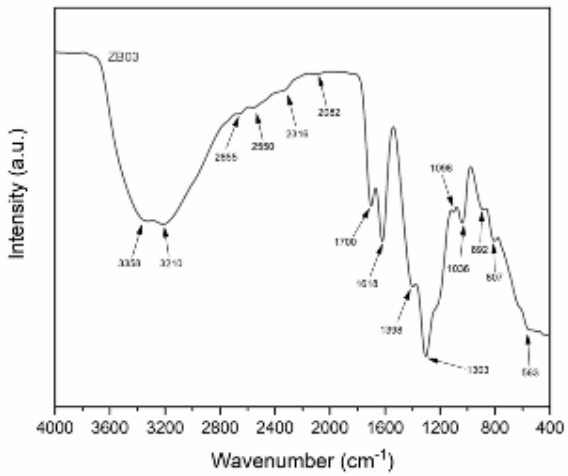


Figura 5. Espectro infrarrojo del xerogel de ZnO posterior al secado.

Las señales que se encuentran entre 3500 cm^{-1} y 3000 cm^{-1} están relacionadas directamente con el grupo hidroxilo (-OH), asociadas a la adsorción de moléculas de agua durante la disolución del $C_6H_8O_7$ y el $Zn(NO_3)_2$, además de la presencia de grupos carboxilo y fenólicos. A las pequeñas bandas mostradas en 2655 y 2550 cm^{-1} se les asocia a compuestos hidrogenados, mientras que la presencia de enlaces C-C se muestra en la longitud de onda en 2316 cm^{-1} y la aparición de enlaces triples C≡C alrededor de 2082 cm^{-1} (Interpretation of Fourier Transform Infrared Spectra (FTIR): A Practical Approach in the Polymer/Plastic Thermal Decomposition. 2023). La banda en 1700 cm^{-1} es ocasionada por el estiramiento de los grupos carbonilo a causa de la disociación de las moléculas de $C_6H_8O_7$. Además, los estiramientos de las señales en 1618, 1398 y 1303 cm^{-1} indican la presencia de los grupos C-H y CH_2. Las bandas que aparecen alrededor de 1500 cm^{-1} y 1100 cm^{-1} corresponden a enlaces C-O y C=C, respectivamente. Por último, los picos que se observan entre 563 cm^{-1} y 892 cm^{-1} son enlaces asociados a las vibraciones entre Zn-O (De Moraes, N. P., et al. 2020, De Moraes, N. P., et al. 2019, Janaki, A. C., Sailatha, E., & Gunasekaran, S. 2015).

El análisis FTIR de muestras de partículas de ZnO se muestra en la Figura. 6. Se identificaron seis señales principales en 2966, 1738, 1385, 1194, 1060 y 693 cm^{-1}. Las señales que se presentan alrededor de 2966, 1194 y 1060 cm-1 corresponden a enlaces CH, C-OH, CH_2- OCH_3/CH_2-CH_3 y grupos funcionales OH de las moléculas de agua adsorbidas las cuales son responsables de la reducción de nanopartículas de ZnO (Janaki, A. C., Sailatha, E., & Gunasekaran, S. 2015). La aparición de la banda a 1738 cm^{-1} es generalmente atribuible al estiramiento de los grupos carbonilo y se puede atribuir a la desorción y/o disociación de las moléculas de ácido cítrico adsorbidas (Ismail, M. A., et al. 2018). La pequeña señal en 1385 cm^{-1} es atribuida al grupo funcional CH_3; esto se explica por los reactivos usados como precursores en la síntesis de partículas de ZnO.

Además, la banda alrededor de 693 cm^{-1} se relaciona con las frecuencias vibratorias de deformación de ZnO debido a algún cambio en las características microestructurales debido a la adición de partículas metálicas a la red Zn-O que pudieron adherirse a la superficie como consecuencia de la recolección de ZnO posterior al secado. Las frecuencias de oxígeno metálico observadas para el óxido metálico respectivo concuerdan con los valores de la literatura (Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., & Ragadhita, R. 2019).

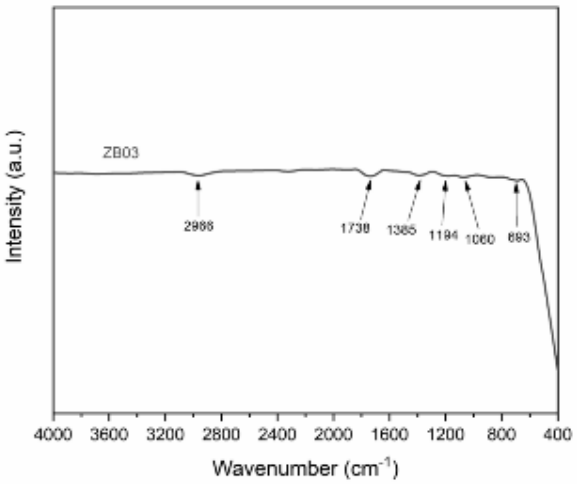


Figura 6. Espectro Infrarrojo de la muestra ZB03 (400°C por 3 horas).

- Difracción de Rayos X (DRX)

Todas las muestras se analizaron mediante difracción de rayos X (DRX) y se realizó un ajuste de perfil para obtener información detallada de cada fase cristalina mediante un ajuste de perfil por el método Le Bail nos permitió conocer, además, los parámetros de celda y geometría del cristalito de ZnO se muestra en la Figura 7.

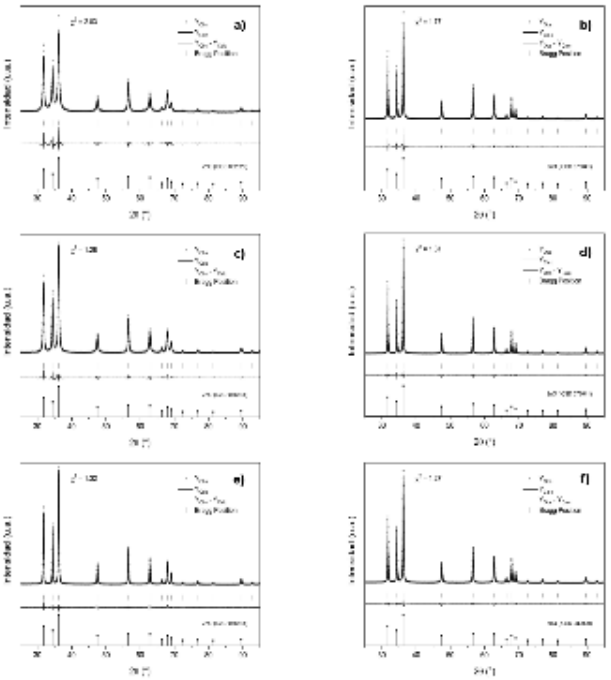


Figura 7. DRX de partículas de ZnO (a) ZB01, (b) ZB02, (c) ZB03, (d) ZB04, (e) ZB05 y (f) ZB06.

La Tabla 2 ofrece una comparativa general de la variación entre el tamaño del cristalito y la temperatura a la que se realizó el tratamiento térmico. La muestra que presentó un menor tamaño de cristalito fue ZB03, lo que corresponde a un calentamiento de 400°C por 3 horas, lo que nos indica que la eficiencia del material ZB03 usado como fotocatalizador está directamente relacionada a su tamaño de aproximadamente 197.57 Angstroms, afectando directamente a los sitios activos en la superficie del material.

- Análisis UV-VIS

La energía de banda prohibida de los materiales de ZnO se determinó mediante espectros de reflectancia difusa (DRS) empleando la función de Kubelka-Munk, considerando una transición directa.

Como se muestra en la Figura 8, los valores obtenidos (3.16–3.18 eV) son ligeramente inferiores a los reportados en la literatura (≈3.2–3.4 eV) (Güy, N., & Özacar, M. 2016, Güy, N., & Özacar, M. 2018, Zhang, Y., et al. 2023), lo que indica una baja respuesta en la región visible y una elevada actividad en radiación UV-C. La muestra ZB01 presentó la mayor desviación, atribuida a su menor tiempo de residencia durante el tratamiento térmico a 400 °C.

- Degradación de Azul de Metileno

Las propiedades fotocatalíticas de los materiales se evaluaron mediante la degradación de AM bajo irradiación UV-C. Para ello, se emplearon soluciones de 30 µM (250 mL) con 0.1 g de catalizador, manteniendo agitación constante durante 2 h de exposición.

Previo al análisis de absorbancia, las muestras fueron centrifugadas a 4500 rpm por 6 min con el fin de eliminar residuos de catalizador y evitar interferencias en las mediciones UV-Vis. Los espectros obtenidos se presentan en las Figuras 9 y 10. Entre los catalizadores evaluados, ZB03 mostró la mayor actividad fotocatalítica, alcanzando un 86% de degradación de AM, lo que sugiere que el tratamiento térmico óptimo corresponde a 400 °C por 3 h. Con el fin de incrementar la eficiencia del proceso, se implementó un sistema tipo Fenton mediante la adición de 20 µL de H_2O_2.

Los resultados, mostrados en la Figura 10 y en la Tabla 3, evidencian un incremento general en la degradación para todos los materiales, alcanzando valores de hasta 97% en el caso del catalizador ZB04, mientras que el resto de las muestras presentaron degradaciones cercanas al 95%.

Tabla 2. Datos resumidos del ajuste de perfil de los patrones de DRX.

Sistema	ZB01	ZB02	ZB03
Temperatura (°C)	400	400	400
Tiempo (h)	1	2	3
Fase	ZnO	ZnO	ZnO
Parámetros de celda (Å)	(P63mc) a, b = 3.24966 c = 5.20860	(P63mc) a, b = 3.25012 c = 5.20736	(P63mc) a, b = 3.24964 c = 5.20891
V (Å)	47.635	47.637	47.638
Geometría	Hexagonal	Hexagonal	Hexagonal
Tamaño de cristalito (Å)	165.05	352.01	197.57
Microtensiones (%)	5.1141	3.0421	6.7168

Sistema	ZB04	ZB05	ZB06
Temperatura (°C)	500	500	500
Tiempo (h)	1	2	3
Fase	ZnO	ZnO	ZnO
Parámetros de celda (Å)	(P63mc) a, b = 3.25000 c = 5.20682	(P63mc) a, b = 3.24976 c = 5.20755	(P63mc) a, b = 3.24974 c = 5.20748
V (Å)	47.629	47.628	47.627
Geometría	Hexagonal	Hexagonal	Hexagonal
Tamaño de cristalito (Å)	467.17	379.40	313.90
Microtensiones (%)	5.3300	6.0700	5.6269

Tabla 3. Resultados resumidos de las pruebas de degradación, comparando el uso de catalizadores contra la implementación de un proceso tipo Fenton.

Muestra	Porcentaje de Degradación	Porcentaje de Degradación usando un proceso tipo Fenton
ZB01	70%	94%
ZB02	62%	93%
ZB03	86%	95%
ZB04	74%	97%
ZB05	70%	95%
ZB06	72%	94%

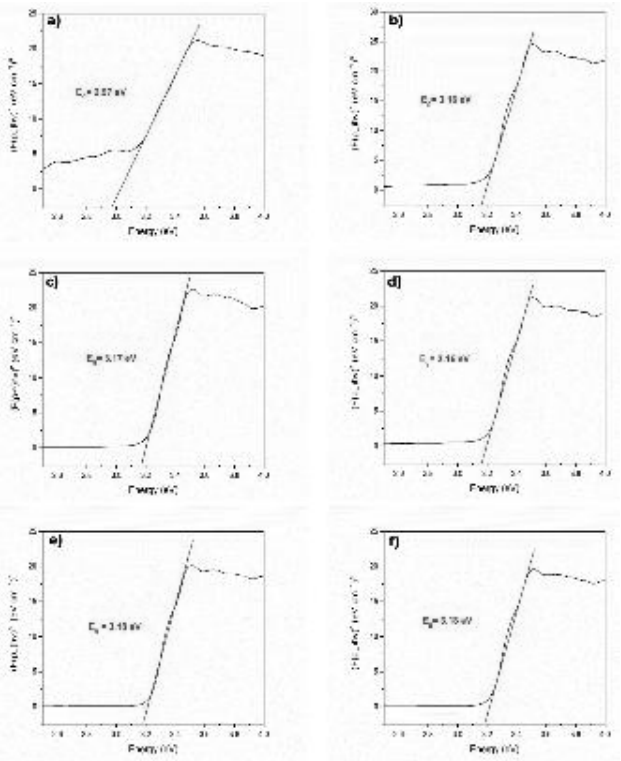


Figura 8. Valores de banda prohibida de las muestras (a) ZB01, (b) ZB02, (c) ZB03, (d) ZB04, (e) ZB05 y (f) ZB06.

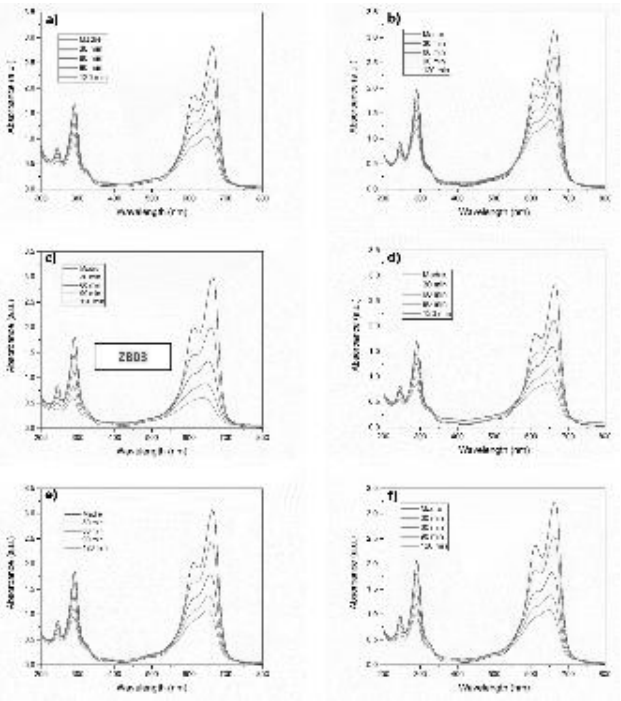


Figura 9. Espectros UV-Vis de degradación de AM utilizando 0.1 gramos de los catalizadores: (a) ZB01, (b) ZB02, (c) ZB03, (d) ZB04, (e) ZB05 y (f) ZB06.

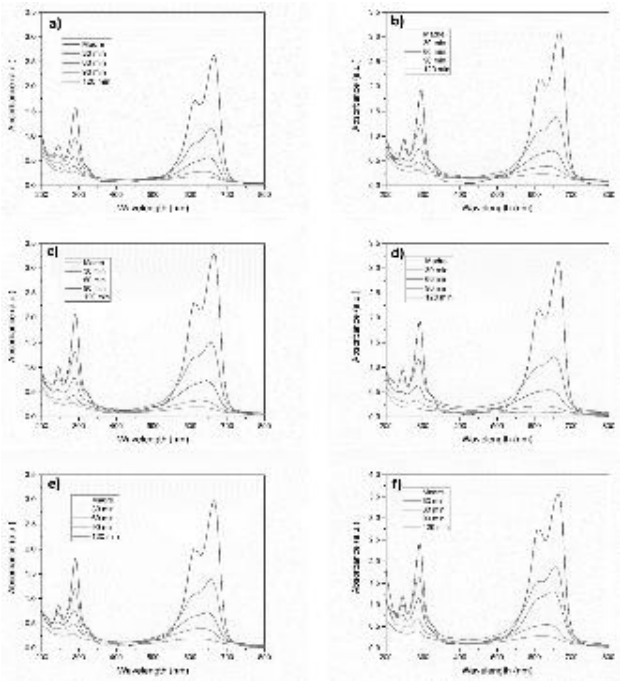


Figura 10. Espectros UV-Vis de degradación de AM utilizando 20 µL de H_2O_2 y 0.1 gramos de los catalizadores: (a) ZB01, (b) ZB02, (c) ZB03, (d) ZB04, (e) ZB05 y (f) ZB06.

- Cinética de la reacción en la degradación de AM

La Tabla 4 resume los valores de las constantes cinéticas y los órdenes de reacción obtenidos en la degradación de AM para las diferentes muestras de ZnO. Estos resultados permiten identificar qué material presenta la mayor velocidad de reacción. La cinética se determinó a partir de las concentraciones registradas en función del tiempo, considerando cinco puntos experimentales obtenidos cada 30 minutos y ajustados mediante la ecuación linealizada de velocidad.

Tabla 4. Orden y constante cinética de reacción en la degradación de AM usando solo catalizadores.

Muestra	Orden de reacción	Constante de reacción
ZB01	1	$1.6803 \times 10^{-4}\ s^{-1}$
ZB02	0.5	$2.90502 \times 10^{-4}\ M^{0.5} \cdot s^{-1}$
ZB03	1	$2.72639 \times 10^{-4}\ s^{-1}$
ZB04	1	$1.88885 \times 10^{-4}\ s^{-1}$
ZB05	1	$1.72143 \times 10^{-4}\ s^{-1}$
ZB06	1	$1.82217 \times 10^{-4}\ s^{-1}$

En la Figura 11 se observa que la mayoría de los catalizadores siguen un modelo de primer orden, con excepción de la muestra ZB02, que presentó un orden de reacción de 0.5. Las muestras ZB02 y ZB03 presentan un valor más grande en la constante de reacción, siendo la muestra ZB02 ligeramente mayor, no obstante, el orden de reacción nos indica que la eficiencia cuántica de generación de portadores de carga es mejor en la muestra ZB03 debido a que su orden de reacción es 1, lo que también nos indica que la adsorción de moléculas de agua sobre la superficie depende linealmente de la

velocidad de reacción. Debido a esto, la muestra ZB03 presenta la mejor cinética, lo que confirma su alta eficiencia fotocatalítica incluso en ausencia del proceso tipo Fenton.

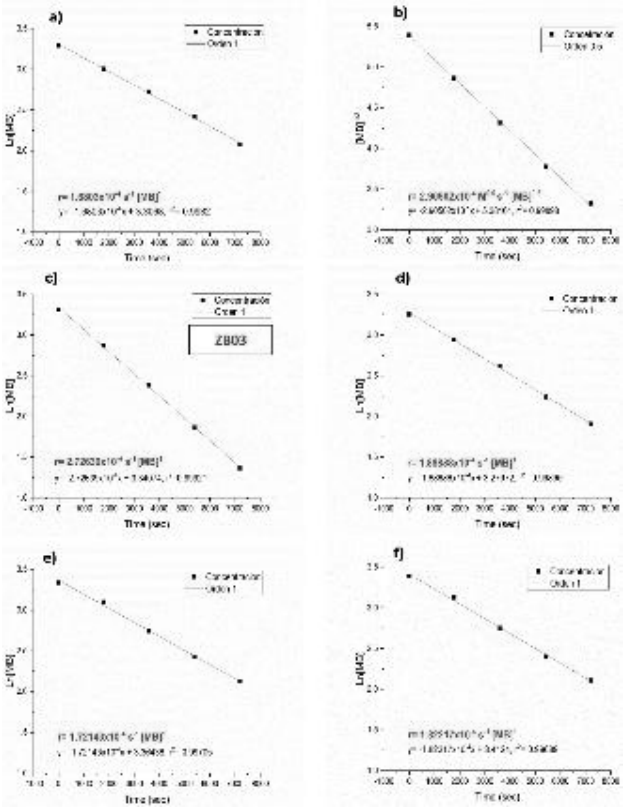


Figura 11. Cinética química en la degradación de AM de las muestras (a) ZB01, (b) ZB02, (c) ZB03, (d) ZB04, (e) ZB05 y (f) ZB06.

Posteriormente, se evaluó la cinética empleando el proceso tipo Fenton (Tabla 5 y Figura 12), donde se mantuvo la misma cantidad de catalizador (0.1 g) y se adicionaron 20 µL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2). La incorporación de H_2O_2 incrementó significativamente la velocidad de reacción, modificando en algunos casos el orden de reacción (Tabla 4) y potenciando la degradación de AM en todas las muestras. Los mejores resultados se obtuvieron en los materiales tratados térmicamente a 400 °C.

Las muestras ZB01 y ZB02 presentaron los órdenes de reacción más grandes, indicando que presentan una buena adsorción de moléculas de agua, sin embargo, tienen las velocidades de reacción más bajas evidenciando una recombinación de portadores de carga sutilmente mayor. En este mismo contexto, las muestras ZB03, ZB04 y ZB05 tienen las velocidades de reacción más altas, siendo la muestra ZB04 la mejor de estas, lo que indica que la eficiencia cuántica de generación de portadores de carga es más efectiva y con una recombinación más lenta, además de que el orden de reacción señala que la adsorción de moléculas de agua sobre la superficie depende linealmente de la velocidad de reacción.

Tabla 5. Orden y constante cinética de reacción en la degradación de AM usando solo catalizadores.

Muestra	Orden de reacción	Constante de reacción
ZB01	1.5	9.13642 x10^{-5} $M^{-0.5}$. s^{-1}
ZB02	1.5	7.85628 x10^{-5} $M^{-0.5}$. s^{-1}
ZB03	1	4.38796 x10^{-4} s^{-1}
ZB04	1	5.03039 x10^{-4} s^{-1}
ZB05	1	4.15306 x10^{-4} s^{-1}
ZB06	0.75	1.69602 x10^{-4} $M^{-0.25}$. s^{-1}

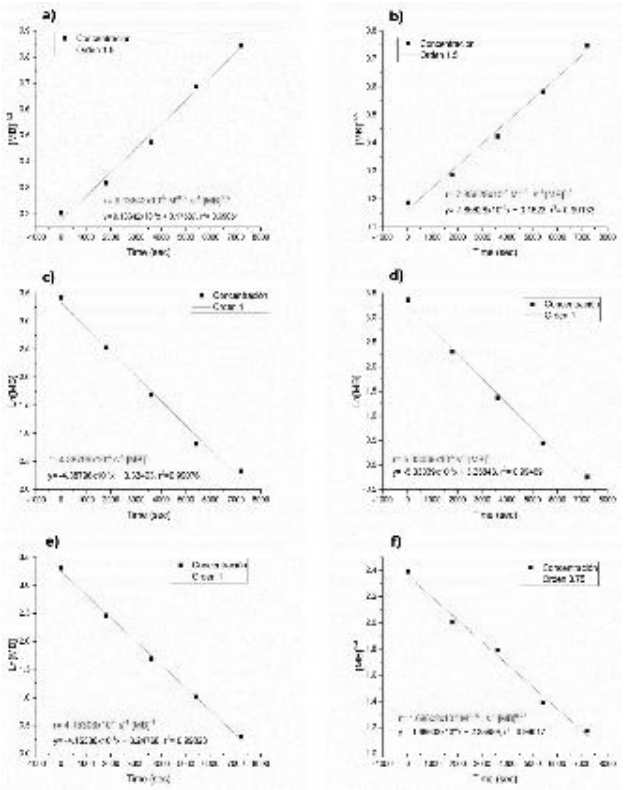


Figura 12. Cinética química en la degradación de AM adicionando 20 µL de H_2O_2 de las muestras (a) ZB01, (b) ZB02, (c) ZB03, (d) ZB04, (e) ZB05 y (f) ZB06.

6. CONCLUSIONES

Los materiales sintetizados de óxido de zinc mostraron una degradación aceptable ante el colorante orgánico azul de metileno, auxiliados por lámparas UV convencionales (radiación UV-C de 6 W, λ = 258 nm). La efectividad de cada muestra se vio afectada de acuerdo con el tratamiento térmico que se les realizó, permitiéndonos comparar y seleccionar aquel que nos ayude a obtener el mayor porcentaje de degradación.

Los materiales sintetizados de óxido de zinc mostraron una degradación aceptable ante el azul de metileno, auxiliados por lámparas UV convencionales. La efectividad de cada muestra se vio afectada de acuerdo con el tratamiento térmico que se les realizó, permitiéndonos comparar y seleccionar aquel que nos ayude a obtener el mayor porcentaje de degradación. El material ZB03 arrojó un porcentaje de degradación aceptable, siendo este superior a 80%. Esto sugiere que el material ZB03

posee características que benefician la descomposición del contaminante, tales como su porosidad, tamaño de cristalito y superficie de contacto, además de considerar un factor clave que contribuye a su alto rendimiento, es decir, la presencia de trazas de carbono en su composición.

Por otra parte, el uso de un proceso tipo Fenton ha mostrado resultados favorables para la fotodegradación de AM. El uso de peróxido de hidrógeno es una buena alternativa para incrementar la efectividad de los catalizadores irradiados con luz UV, pues fomenta la producción de radicales hidroxilos (•OH) aumentando la actividad fotocatalítica, aun manteniendo una baja concentración de H_2O_2, este proceso de oxidación favoreció de manera significativa a la muestra ZB04, mostrando un porcentaje de degradación de 97% ante el contaminante azul de metileno.

En resumen, el material ZB03 ha demostrado ser un candidato prometedor en la remoción de azul de metileno, y su alto rendimiento en la degradación de este contaminante plantea nuevas oportunidades para su utilización en procesos de purificación y tratamiento ambiental. Por otro lado, se buscará ampliar la actividad fotocatalítica con la formulación del mejor material (ZB03), complementando el proceso con la adición de H_2O_2 para poder implementarlo en el tratamiento de efluentes industriales con la ayuda de un fotorreactor, además de evaluar su comportamiento de degradación con diferentes tipos de colorantes textiles usados por las industrias en la actualidad, lo que nos proporcionará una perspectiva de alcances y limitaciones respecto al ZnO.

REFERENCIAS

Aina, R. N., Patel, H., Aich, S., Roy, B., & Samanta, N. S. (2025). Recent advances in ZnO based photocatalysts for industrial dye degradation. SN Applied Sciences, 7(2), 453. https://doi.org/10.1007/s42452-025-07530-z.

Bokare, A. D., & Choi, W. (2014). Review of iron-free Fenton-like systems for activating H2O2 in advanced oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials, 275*, 121–135.

Cheng, M., et al. (2016). Hydroxyl radicals based advanced oxidation processes (AOPs) for remediation of soils contaminated with organic compounds: a review. *Chemical Engineering Journal, 284*, 582–598.

De Moraes, N. P., et al. (2019). Synthesis of novel ZnO/carbon xerogel composites: Effect of carbon content and calcination temperature on their structural and photocatalytic properties. *Ceramics International, 45*(3), 3657–3667.

De Moraes, N. P., et al. (2020). Effect of synthesis medium on structural and photocatalytic properties of ZnO/carbon xerogel composites for solar and visible light degradation of 4-chlorophenol and bisphenol A. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 584*, 124034.

Dewil, R., et al. (2017). New perspectives for advanced oxidation processes. *Journal of Environmental Management, 195*, 93–99.

Gligorovski, S., et al. (2015). Environmental implications of hydroxyl radicals (• OH). *Chemical Reviews, 115*(24), 13051–13092.

Güy, N., & Özacar, M. (2016). The influence of noble metals on photocatalytic activity of ZnO for Congo red degradation. *International Journal of Hydrogen Energy, 41*(44), 20100–20112.

Güy, N., & Özacar, M. (2018). Visible light-induced degradation of indigo carmine over ZnFe2O4/Tannin/ZnO: Role of tannin as a modifier and its degradation mechanism. *International Journal of Hydrogen Energy, 43*(18), 8779–8793.

Interpretation of Fourier Transform Infrared Spectra (FTIR): A Practical Approach in the Polymer/Plastic Thermal Decomposition. (2023). *Indonesian Journal of Science and Technology, 8*(1), 113–126.

Ismail, M. A., et al. (2018). ZnO nanoparticles: Surface and X-ray profile analysis. *J. Ovonic Res, 14*(5), 381–393.

Janaki, A. C., Sailatha, E., & Gunasekaran, S. (2015). Synthesis, characteristics and antimicrobial activity of ZnO nanoparticles. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 144*, 17–22.

Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., & Ragadhita, R. (2019). How to read and interpret FTIR spectroscope of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology, 4*(1), 97–118.

Nishigori, C., et al. (2023). Biological impact of shorter wavelength ultraviolet radiation-C. *Photochemistry and Photobiology, 99*(2), 335–343.

Pandis, P. K., et al. (2022). Key points of advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater, organic pollutants and pharmaceutical waste treatment: A mini review. *ChemEngineering, 6*(1), 8.

Santiago, L. A. C., et al. (2022). Fe–Zn–Ti combined systems as photocatalysts for hydroxyl radicals production in sunlight. *International Journal of Hydrogen Energy, 47*(74), 31888–31902.

Vaitsis, C., et al. (2020). Ultrasound-assisted preparation methods of nanoparticles for energy-related applications. *Nanotechnology and the Environment*, 77–103.

Zaruma, P., et al. (2018). Los colorantes textiles industriales y tratamientos óptimos de sus efluentes de agua residual: una breve revisión. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas, 19*, 38–47.

Zhang, Y., et al. (2023). Heterogeneous photocatalytic oxidation for the removal of organophosphorus pollutants from aqueous solutions: A review. *Science of the Total Environment, 856*, 159048.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

1D-TiO_2 thin films with CdS quantum dots for the production of solar fuels from greenhouse gases (CO_2)

Luis Antonio García Contreras*, Rafael G. Suárez Nájera*, José O. Flores Flores, Rodolfo Zanella Specia**, Roberto Y. Sato Berrú**, José A. Chávez Carvayar***

** Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, 04510, México. (E-mail: lagc57an@gmail.com.)*
***Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, 04510, México.*

Abstract: This paper describes the experimental procedure for the synthesis of 1-dimensional TiO_2 (1D-TiO_2) materials with CdS quantum dot deposition and their application in the transformation of CO_2 to methanol through heterogeneous photocatalysis in the gas phase. The 1D-TiO_2 synthesis of TiO_2 crystalline phase materials (brookite and rutile) was carried out in two stages. The first stage consisted of alkaline hydrothermal treatments with NaOH using TiO_2 powders (Degussa P25) and subsequent washing with deionized water to obtain 1D -TiO_2 ($H_2Ti_3O_7$) materials. In the second stage, a hydrothermal process was used to promote the phase transformation of the 1D-TiO_2 material and deposit the CdS quantum dots. Subsequently, the materials obtained were deposited on SiO_2 substrates using the dip-coating method to obtain thin films of the material. The synthesized materials were characterized by X-ray diffraction (XRD), N_2 adsorption-desorption, scanning and transmission electron microscopy (SEM and TEM), Raman and UV-Vis spectroscopy. The photocatalytic tests were carried out by producing CO_2 in situ in a closed reactor with thin film support coupled to the gas attachment of Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) equipment, which was used to monitor the transformation of CO_2 into methanol. After 10 hours, the photocatalytic tests showed a CO_2 conversion efficiency of ~73.6%, an activity that was related to the co-catalyst effect of CdS quantum dots in 1D-TiO_2 materials.

Keywords: Quantum dots, TiO_2, CdS, photocatalysis, solar fuels, CO_2 gas, greenhouse effect.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, algunos de los temas de elevado interés, tanto para la sociedad como en la comunidad científica, son los relacionados con la contaminación ambiental, el cambio climático y el desarrollo de tecnologías para obtención de energías verdes, renovables y limpias (Ge et al. 2017). el aumento de la demanda de energía y el cambio climático, ha conducido a un incremento en la búsqueda de alternativas para subsanar la demanda de energía global, contemplando también el buen trato del medio ambiente, principalmente en áreas donde los gases de efecto invernadero toman mayor importancia. Aunque existen varias tecnologías y formas en las cuales se puede almacenar y reutilizar en la industria química los gases de efecto invernadero como CO_2, estos suelen ser costosos y poco eficientes, lo que las limita en su utilización (Bellardita et al. 2013). Una solución alternativa que ha tomado relevancia es la conversión de CO_2 a otros tipos de compuestos como alcoholes (Gust, Moore & Moore 2009), entre las tecnologías que se encuentran disponibles para este proceso de conversión de gases de efecto invernadero es la fotocatálisis la que se presenta con mayor relevancia en los últimos años (Liu et al. 2012); la fotocatálisis se basa en el uso de materiales semiconductores, por medio de los cuales, se busca producir mediante proceso Redox reacciones químicas que produzcan compuestos como los alcoholes para su utilización como fuente energética; este tipo de tecnología empleada para producir compuestos con carácter de uso energético, se le conoce como fotosíntesis artificial o como fotocatálisis para la producción de combustibles solares (Gleiter 2000; Zhou et al. 2010; Razali et al. 2012; Tripathi et al. 2014), la cual busca utilizar además de forma efectiva la radiación solar. Esta tecnología, tiene un amplio camino por recorrer en investigación y desarrollo, sobre todo en encontrar los materiales adecuados para que se den las reacciones fisicoquímicas de forma más eficiente al ser irradiados por la luz solar. Entre estos materiales son los materiales nanoestructurados de TiO_2 (Roy et al. 2010; Xu et al. 2017), los que se muestras con propiedades adecuadas para su aplicación en te tipo de tecnologías, debido a su área superficial, valor de brecha de trabajo con longitudes de onda muy específicas para generar cargas fotogeneradas y transporte efectivo de estas a nivel superficial para que se lleven de forma eficiente las reacciones fisicoquímicas en la superficie del material; propiedades que suelen relacionarse con la estructura cristalina, tamaño y forma del material. Entre los materiales nanoestructurados, son los de forma unidimensional como los nanotubos de TiO_2 (Liu et al. 2012;

Chen, Xiong & Cheng 2024), los que se presentan como buenos prospectos y susceptibles a mejoras debido a sus propiedades morfológicas, nentre las que destacan: la configuración de sus facetas octaédricas o caras expuestas, confinamiento cuántico, área superficial y migración más efectiva de las cargas hacia la superficie, por lo que pueden funcionar como plataformas adecuadas para ser susceptibles a mejoras como depósitos de otros materiales, como lo son los puntos cuánticos de CdS (Zong et al. 2008; Liu et al. 2017; Moya), haciéndolos más eficientes los procesos fisicoquímicos en la producción de los combustibles solares debido a su efecto co-catalizador.

Aunque es posible sintetizar materiales que se basan en TiO_2 y morfologías unidimensionales como los nanotubos (NT), principalmente estos materiales siguen siendo sintetizados en fases cristalinas como $H_2Ti_3O_7$ o transformaciones de fases puras como anatasa, en estas transformaciones suelen perder propiedades relacionadas con su capacidad fotocatalítica como área superficial y presentar altas tasas de recombinación electrónica, lo que ha hecho evidente encontrar métodos de síntesis que permitan obtener otras combinaciones de fase de TiO_2 en morfologías unidimensionales, con las cuales puedan darse propiedades mejoradas como efectos de transporte electrónico más eficiente entre las fases cristalinas presentes, principalmente la fase brookita de TiO_2, la cual es menos estudiada, ya sea mezclada o pura; ya que su obtención suele requerir concentraciones de ácido muy elevadas y largos tiempos de cristalización de hasta 48 horas en condiciones súper críticas, lo que limita la formación de estructuras unidimensionales u otras morfologías con crecimientos preferenciales, además, a menudo es necesario añadir elementos adicionales para ajustar el pH de la disolución, como en métodos como la peptización y sumando a esto su costo e impacto ambiental para su obtención (Pottier et al. 2001; Bellardita et al. 2013; García-Contreras et al. 2025). Esto añade una mayor complejidad a la obtención de esta fase cristalina, ya que estos elementos añadidos deben eliminarse posteriormente mediante calcinación, lo que a su vez provoca la pérdida de la morfología y sus características nanométricas, debido al aumento de su cristalinidad, lo que conduce a una pérdida irreversible de propiedades como la superficie específica.

Si bien la fase brookita también ha demostrado una buena actividad fotocatalítica en algunos procesos fotocatalíticos (García-Contreras et al. 2025), su uso es menos frecuente en la transformación de CO_2 utilizando fotocatálisis, debido a que para lograr la transformación de este gas se requiere de la activación de dos moléculas termodinámicamente estables como son el agua y el CO_2, de las cuales se puede obtener hidrógeno por descomposición fotocatalítica del agua, así como reducir o transformar la molécula de CO_2 para la formación de combustibles solares. Estos procesos ponen de evidencia la necesidad de diseñar fotocatalizadores eficientes que permitan la viabilidad del proceso. En este aspecto los materiales unidimensionales basados en TiO_2 con combinaciones de fase cristalinas, puede presentar mejoras significativas, al sintetizarlos con tamaños y geometrías adecuadas junto con un área superficial de contacto mejorada, dando lugar al depósito de materiales que agreguen un efecto co-catalizador mejorado al transportar eficientemente los electrones requeridos para producción de hidrógeno y la transformación de CO_2. Entre los materiales que pueden tener este tipo de efecto se encuentran los materiales como los puntos cuánticos, si bien existe una infinidad de puntos cuánticos de distintos materiales, los puntos cuánticos de CdS son los que se muestran como punto de partida para caracterizar propiedades como el efecto co-catalitico de transporte electrónico y la cantidad efectiva de depósito (Kozhevnikova et al. 2019) para determinar la mejor eficiencia de relación de saturación superficial de depósito, además, mejora características como el band gap de trabajo, con un intervalo más amplio de trabajo en el espectro visible (Zong et al. 2008; Kozhevnikova et al. 2019). Todas las mejoras mencionadas anteriormente podrían aumentar de manera significativa la eficiencia en el aprovechamiento del espectro de luz y una mejor actividad en los procesos fotocatalíticos (separación y transporte de cargas generadas, actividad superficial, etc). Lo que daría como resultados materiales con un alto valor agregado para la remediación de la contaminación ambiental y búsqueda de fuentes de alternativas de energía verde.

Es así que en este trabajo mostramos las condiciones de síntesis para la obtención de un material unidimensional de TiO_2 como los nanotubos, y el cambio o transformación estructural a fase cristalina como la brookita/rutilo y la mejora que presentan estos materiales al depositarles puntos cuánticos como CdS, mediante un método de síntesis fácil y eficiente; además de su aplicación mejorada al ser soportados sobre sustratos de SiO_2 en películas delgadas para su aplicación en la obtención de un combustible solar como el metanol atreves de la transformación fotocatalítica de dióxido de carbono (CO_2) mediante fotocatálisis heterogénea en fase gaseosa.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. Reactivos

Todos los productos químicos fueron de grado analítico y se usaron sin purificación adicional a la mencionada en la etiqueta: iso-propóxido de titanio (IV) (Sigma-Aldrich 98% CAS 546689), ácido clorhídrico (HCl, Sigma-Aldrich, 37% CAS 7647010), hidróxido de sodio (NaOH, Sigma-Aldrich, 98% CAS1310732), titania P25 (TiO2, Degussa, Aeroxide 99.5% CAS 13463677), metanol grado HPLC (CH_3OH, CAS 67-56-1); y se usó agua desionizada a lo largo de este trabajo.

2.2. Método de síntesis

Se colocan 0.5 g de TiO_2 (Degussa P25) en un recipiente de teflón de 50 ml con 35 ml de una disolución 10M de NaOH,

se dispersa el material durante 30 min a temperatura ambiente, mediante el uso de una muesca de agitación. Posteriormente, la suspensión se transfirió a una autoclave de acero inoxidable y se mantuvo a una temperatura de 160 °C durante 48 h. El producto blanco obtenido se filtró y lavó con HCl 0.1 M en agua desionizada a temperatura ambiente hasta que el material en la suspensión alcanzó un pH=7. El producto resultante se secó durante 24 h a 60 °C obteniendo $H_2Ti_3O_7$ (materiales 1D-TiO_2). Para el procedimiento del cambio de fase de $H_2Ti_3O_7$ a fases cristalinas de brookita/rutilo, y depósito de los puntos cuánticos de CdS, se realizó mediante el siguiente procedimiento; Se tomaron 0.5 g de $H_2Ti_3O_7$ y fueron sometidas a un proceso hidrotermal con una temperara de 80 °C por 12 h con una mezcla de $Cd(NO_3)_2/Na_2S$, la cual consta de una disolución de 0.55 g de $Cd(NO_3)$ en 50 mL de agua desionizada que fue homogenizada por agitación vigorosa durante 10 min, a la cual se le agregó mediante goteo (1mL/min) una segunda disolución (50 mL) de 0.20 mg de Na_2S. Después de lograr la homogenización de las disoluciones, se añadió un disolución de NaOH (0.1M)/H_2O y TiO_2 (materiales 1D-TiO_2, donde la relación peso de CdS respecto al TiO_2 fue de 1 % wt.). Una vez terminado el proceso hidrotermal, se lavaron los materiales solidos con agua desionizada 4 veces mediante el uso de una centrifugadora a 10,000 rpm; después del ciclo de lavado los materiales son puestos en una disolución de agua desionizada y etanol anhidro (50/50 % vol), para posteriormente, ser depositados por medio de *dip-coating* sobre sustratos de vidrio (tratados superficialmente con disoluciones de 1M de HF) con un proceso de impregnando de $1cm^2$/10 min y un pH neutro, y que fueron secados a una temperatura de 100 °C durante 12h.

2.3. Caracterización

Los patrones DRX de las muestras fueron obtenidos en un difractómetro marca BRUKER Avancen D8 a temperatura ambiente, usando la radiación Cu K_α (λ= 0.15405 nm), voltaje 40 kV, corriente 100 mA, que posee una configuración y un monocromador de grafito en el haz secundario. La intensidad de difracción se midió en el intervalo de 20° a 80°, con pasos de 0.02°. Las morfologías de las muestras sintetizadas, se observaron mediante un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) de Ultra-Alta Resolución JSM-7800F (Con una distancia de trabajo de 4 y 8 mm, y voltajes de 2–10 kV) detectando los electrones secundarios (Modo SEI). Se registraron imágenes de Microscopía Electrónica de Transmisión de alta resolución (HRTEM) en un espectrofotómetro de emisión de campo Schottky JEOL 2100 JEOL ARM200F con resolución atómica a un voltaje de aceleración de 200 kV. Los espectros Raman, fueron obtenidos utilizando un equipo Raman-WITec confocal, utilizando un láser de 532 nm con ajuste de potencia de 3.4 mW. Las isotermas de adsorción-desorción de N_2 se midieron a 77 K con el analizador de área superficial Quantachrome Autosorb 1, mediante el método Brunauer-Emmett-Teller (BET), en un rango de presión relativa de 0.05 a 0.30. Los espectros de reflectancia difusa UV-Vis de los materiales se obtuvieron a temperatura ambiente con un espectrómetro Cary 5000 Varian (UV-VIS-NIR), equipado con un accesorio de reflectancia difusa (mantis religiosa). Los espectros se obtuvieron en el rango de 200 a 800 nm, utilizando politetrafluoroetileno como material estándar de reflectancia.

2.4. Transformación fotocatalítica de dióxido de carbono (CO_2)

Tras establecer las condiciones de síntesis, se preparó una cantidad suficiente de cada material para garantizar la reproducibilidad en los experimentos fotocatalíticos, los cuales se realizaron por triplicado. El seguimiento de los ensayos fotocatalíticos, para la transformación fotocatalítica de dióxido de carbono (CO_2), se realizó mediante el análisis de los espectros FT-IR que fueron obtenidos en un espectrómetro Nicolet IS50R FT-IR Thermo Scientific, utilizando 100 barridos con una resolución de 4 cm^{-1}, mediante el uso del aditamento de celda de gases acoplado a un arreglo experimental el cual consta de un soporte de películas delgadas con el material sintetizado y en el cual se produjo de manera in situ de CO_2. En este arreglo experimental, se utilizó un reactor cerrado de vidrio de 200 mL y con un tubo de cuarzo en el centro, y con entradas selladas con septum de caucho de silicona de alta presión. Se utilizó una lámpara de Hg de alta presión (5W, con longitud de onda primaria λ=254 nm) como fuente de luz de excitación, insertada en el tubo de cuarzo a una distancia de 10 cm de la base del reactor en e cual se fijan las películas delgadas del material. En cada experimento se colocaron las películas delgadas de forma circundante al tubo de cuarzo.

En el fondo del reactor se coloca de $NaHCO_3$ (en un pequeño vidrio de reloj sobre el fondo del reactor), que será utilizado posteriormente para generar una atmósfera rica de CO_2 mediante una reacción con ácido clorhídrico. Antes de la irradiación con la fuente de excitación, mediante el empleo de dos válvulas de alimentación de gas acopladas a las dos entradas de la tapa del rector, se purga con N_2 para eliminar el aire y humedad para garantizar que el sistema de reacción esté en condiciones anaeróbicas y libre de otros gases del ambiente. Para esto se usó un flujo de gas de N_2 100 mL/min por un tiempo de 10 min para cada muestreo. Posteriormente, se generó in-situ vapor de H_2O y CO_2 mediante la reacción de $NaHCO_3$ (0.12 g) y disolución acuosa de 0.25 mL de HCl (2 M) que se introdujo en el reactor usando una jeringa; la temperatura en el reactor se estabilizó a 30 °C mientras, se mantiene bajo irradiación UV durante 8h. Las tomas de muestra para determinar la calidad de CO_2 se realizó mediante la toma de una muestra de 1 mL de la mezcla del gas suspendida en el reactor mediante el acople del sistema de reacción al aditamento de gases del equipo de infrarrojo (celda).

3. RESULTADOS

Los difractogramas y espectros Raman obtenidos, son característicos de cada una de las fases cristalinas del TiO_2

presentes en cada material que fueron sintetizados, en la Figura 1a, se muestra el patrón DRX (con un intervalo de los picos principales de las fases cristalinas principales identificadas) con las fases cristalinas de TiO_2 presentes, que son la fase rutilo que corresponden con la ficha de identificacion JCPDS: 01-073-1782 y la fase de brookita que corresponde con JCPDS: 96-900-9088, no se detectaron reflexiones adicionales de los puntos cuánticos de CdS debido a la menor proporciones de estos presentes en el material , y que se encuentra por debajo del límite de detección del equipo u otras reflexiones relacionadas con impurezas. Además, se realizó el método de deconvolución numérica para identificar y calcular el porcentaje de fase presente, el patrón de difracción muestra el intervalo 2θ de 23 a 33°, donde se ajustaron los picos principales del rutilo (110), de anatasa (101) y la brookita (120), (111) y (121), tras la sustracción de la línea base y la corrección de polarización de Lorentz, mediante curvas de Pearson VII (Zhang & Banfield 2000). El contenido de fase en cada material puede calcularse mediante el método conocido, con las siguientes ecuaciones: (He et al. 2019; Zhu et al. 2021; Szołdra et al. 2023).

$$w_A = \frac{K_A A_A}{K_A A_A + A_R + K_B A_B} \quad \text{..... Ec. (1)}$$

$$w_R = \frac{A_R}{K_A A_A + A_R + K_B A_B} \quad \text{..... Ec. (2)}$$

$$w_B = \frac{K_B A_B}{K_A A_A + A_R + K_B A_B} \quad \text{..... Eq. (3)}$$

Donde A_A representa la intensidad integrada del pico de anatasa (101), A_R la intensidad integrada del pico de rutilo (110) y A_B la intensidad integrada del pico de brookita (121); W_A, W_R y W_B representan la fracción en peso de anatasa, rutilo y brookita, respectivamente. Con esta metodología, se estimó el contenido de las fases de anatasa, brookita y rutilo en cada material.

Además, estas fases cristalinas presentes en el material también fueron identificadas por los planos cristalinos de cada fase como se muestra en la imagen HRTEM (Figura 2), lo que confirma que las distancias interplanares de aproximadamente d_{hkl}=0.29 y 0.32 nm corresponden a los planos (121) y (110) del rutilo y la brookita, respectivamente. En la Figura 1b se observa las bandas de vibración Raman características de cada fase rutilo (grupo espacial D4h 14) existen cuatro bandas típicas que aparecen en el espectro Raman a E_g (446 cm^{-1}) B_{1g} (140 cm^{-1}), y A_{1g} (611 cm^{-1}) y 238 cm^{-1}; mientras que para la fase brookita (grupo espacial Pcab) se puede identificar por su modo vibracional fuerte y característico a 153 cm^{-1} correspondiente al modo A_{1g} (Ceballos-Chuc et al. 2018; Chen et al. 2019; Chalastara et al. 2020; Du et al. 2022; García-Contreras et al. 2022). De manera simular con cargas de CdS <2 % en peso, no se pudieron observar bandas relacionadas con el CdS (Chen et al. 2013; Khan et al. 2020; Sadanandam et al. 2021).

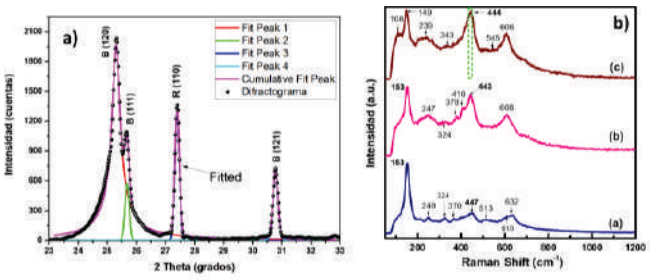


Figura 1. a) Ejemplo de deconvolución de patrones de difracción de rayos X (Puntos: experimentales) y b) Espectros Raman de las fases presentes de TiO_2 en los materiales con depósitos de puntos cuánticos de CdS.

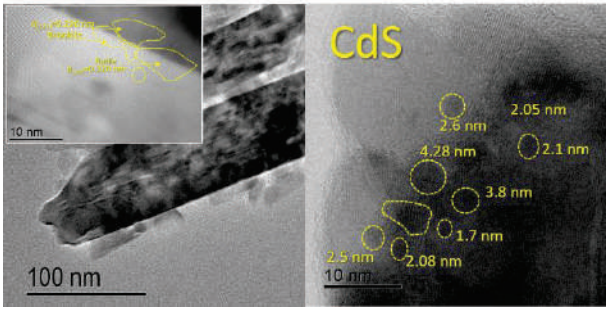


Figura 2. Imágenes MEB y MET de alta resolución de las morfologías y los puntos cuánticos de CdS depositados.

Los valores del área superficial del material también se analizaron antes y después de los depósitos en la Figura 4 se presentan las isotermas de adsorción/desorción de nitrógeno (N_2) de los materiales, con sus valores de área superficial estimados a partir de las isotermas, utilizado método BET. Se observó que los materiales sintetizados presentaron isotermas de tipo IV y ciclos de histéresis H_3, en el rango de presión relativa (P/P_2) de 0.5 a 1.0, lo que revela la existencia de estructuras con propiedades mesoporosas según la clasificación de la IUPAC (Sing 1985; Liao et al. 2012; Rui et al. 2013; Kaplan, Erjavec & Pintar 2015; Makal & Das 2018; Xu et al. 2019; Chalastara et al. 2020). Además, no presentan una plataforma de adsorción límite en condiciones de presión relativamente alta cercanas a la presión de saturación, característica de los materiales compuestos por partículas laminares y poros flexibles (Zhang et al. 2017; Xu et al. 2019). Esta variación en los valores de área superficial se relaciona con las condiciones de síntesis así como con las propiedades de las morfologías orientadas a partir de titanatos, donde las áreas superficiales suelen ser menores a 100 m^2 g^{-1} (Niederberger & Cölfen 2006; Zhao & Yan 2011; Lyu et al. 2020), debido a los espacios internos de las morfologías debido a los cambios de fase (Camposeco et al. 2012; Wetchakun et al. 2012; Chalastara et al. 2020). En la Figura 5, se observa otra propiedad fundamental analizada que fue el valor de la brecha de banda óptica (E_g), calculada a partir de los espectros UV-Vis. Como se ha mencionó en otros trabajos, la anatasa es un semiconductor de transición indirecta, mientras que el rutilo y la brookita son directos en

sus formas puras (Žerjav et al. 2022); para los materiales de este trabajo se calculó el valor de E_g-indirecto mediante el método Tauc, utilizando el gráfico $(\alpha h\nu)^{1/n}=A(h\nu-E_g)$ obtenido a partir de los espectros de reflectancia difusa (López & Gómez 2012; Praveen et al. 2014; Tran et al. 2017; Makal & Das 2018; Freyria et al. 2020; Khan et al. 2020).

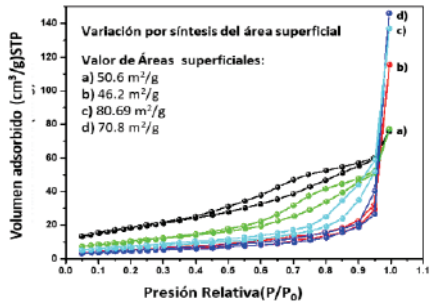


Figura 4. Isotermas de absorción/desorción de N_2 de los materiales de TiO_2 antes y después del depósito de CdS.

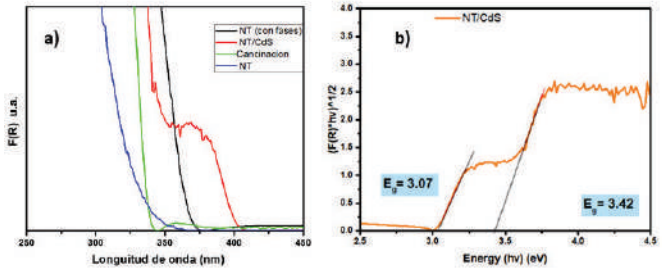


Figura 5. a) Espectros de reflectancia difusa UV-vis de los materiales de TiO_2 donde NT son los nanotubos, NT/Cds son los materiales con depósito de puntos cuánticos, y el material sometido a calcinación. Y b) es el ejemplo del cálculo de valor de la brecha de banda óptica en el material con depósito de puntos cuánticos de CdS.

Todos los espectros de reflectancia difusa se adquirieron utilizando la función Kubelka-Munk (F(R)) incluida en el software de procesamiento de datos del espectrofotómetro. Por lo tanto, el coeficiente de absorción (α) se considera proporcional a (F(R)) y se sustituyó en el gráfico Tauc. Los intervalos de banda (E_g) se determinaron extrapolando la línea recta de los gráficos en el punto $(F(R)\cdot h\nu)^{1/2}= 0$. En los espectros UV-Vis de los materiales, se puede observar el umbral de absorción de cada uno de ellos, el cual se atribuye a la transferencia de carga de $O^{2-}\rightarrow Ti^{4+}$ (Henderson 2011; Henderson 2011; Xin et al. 2016; Romeiro et al. 2018; Gaur et al. 2019), además, se aprecia el desplazamiento gradual del borde de absorción hacia el azul, conforme aumenta la temperatura del tratamiento térmico y el depósito de CdS, los materiales mostraron valores que se encuentran cercanos al rango de valores de ~3.06 eV para rutilo y un valor adicional en el material que presenta el depósito de CdS de ~3.42 eV relacionado con la bifase de NT y el depósito de los puntos cuánticos, haciendo al material más eficiente al ser excitado por una longitud de onda cercana al UV-A y UV-C, por lo cual puede tener un mejor comportamiento en la absorción del espectro de trabajo.

4. TRANSFORMACIÓN FOTOCATALÍTICA DE CO_2

La transformación fotocatalítica de dióxido de carbono (CO_2) se llevó a cabo, utilizando un método experimental presentado en la sección experimental mediante el reactor que se presenta en la Figura 6. Una vez colocadas apropiadamente las películas delgadas en el reactor y alcanzar las condiciones anaeróbicas y libre de otros gases del ambiente, se procedió a producir la formación de CO_2 in-situ, el uso de HCl en el experimento, es por la estabilidad que presentan las nanoestructuras 1D de TiO_2 a nivel superficial para favorecer las reacciones del medio gaseoso con la superficie del fotocatalizador (Bavykin et al. 2005). Para posteriormente, proceder al ensayo fotocatalítico para determinar la transformación del CO_2 a otro subproducto de interés atreves del análisis de los espectros obtenidos por FT-IR, mediante la toma de muestras de la mezcla de gases producidos en el reactor por cada análisis mediante el uso del aditamento de gases (celda de gases) del equipo de FT-IR (Figura 7).

Figura 6. Arreglo experimental, reactor fotocatalítico de CO_2 *in-situ.*

Figura 7. Celda de muestras en fase gas a acoplada al espectrómetro Nicolet IS50R FT-IR Thermo Scientific.

Para el análisis de la transformación *in-situ* de CO_2 se siguieron las bandas características del CO_2 de los espectros de cada muestra. En la Figura 8A, se muestran los espectros FT-IR de control antes de cada experimento, para determinar la no presencia de otros compuestos, es posible observar la presencia de CO_2, para cada muestra tomada, donde (a) son

los componentes ambientales (ATM), (b) espectro después de la purga del sistema con gas N_2 y (c) la producción de CO_2 in-situ antes de iniciar cada experimento, en estos espectros al igual que en los espectros de los ensayos fotocatalíticos, se sigue la evolución de las bandas de estiramiento antisimétrico ν3 (2345-2325 cm^{-1}) y el modo de flexión ν2 (665-635 cm^{-1}) que son más afines a las características de nuestro estudio para determinar el comportamiento del CO_2 que se presenta en los ensayos fotocatalíticos. Además, se observa la banda de combinación de CO_2 (ν1+ν3) y las bandas de combinación/sobre tono (2ν2+ν3) que aparecen en ~3702 cm^{-1} y 3600 cm^{-1}, respectivamente. Adicionalmente a las señales del CO_2 también se muestran los modos ν1, ν2 y ν3 asignados a las bandas 3627, 1595 y 3735 cm^{-1} respectivamente del H_2O que a lo largo de los experimentos se observan, como un subproducto de la reacción *in-situ* de la producción de CO_2 (Kauffman et al. 2011; Stefani et al. 2013; Krukowski et al. 2015; Barannik, Shiryaev & Hainschwang 2021). De manera preliminar, se utilizó el material comercial de TiO_2 como Degussa P25 (DP25) con y sin puntos cuánticos de CdS como margen de control, en la Figura 8B, se observan los espectros FT-IR de las señales de CO_2, utilizando el material de control donde una disminución de la señal, se asocia a la absorción de CO_2 por el material. Donde el espectro (a) es la señal al inicio del experimento, (b) la señal de CO_2 o de cualquier cambio después de 6h de experimento y (c) la actividad del material con puntos cuánticos de CdS; en los cuales, no se observó la contribución de la señal de algún subproducto adicional al de las bandas del CO_2 y del H_2O, que se pudiera detectar por el equipo, por lo que se asume que los materiales, no tienen actividad en la transformación de CO_2.

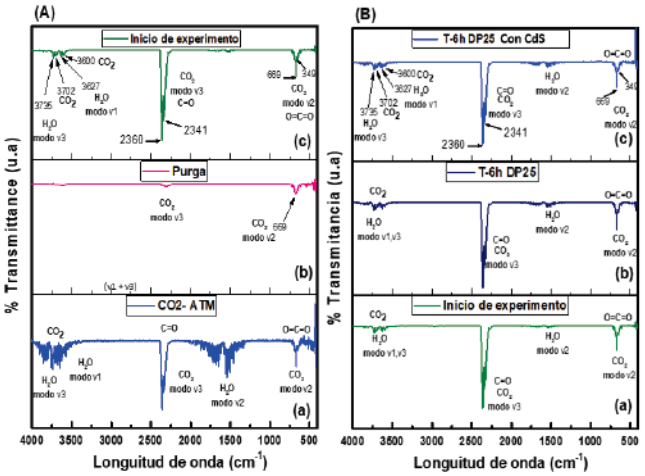


Figura 8. Espectros FT-IR (A) de las señales de control de la presencia de CO_2 y (B) de la actividad fotocatalítica al utilizar Degussa P25 con y sin depósito de puntos cuánticos de CdS.

En la Figura 9A-C, Se puedo observar que al proceder con los ensayos fotocatalíticos con el material de 1D-TiO_2 con CdS se presentan las bandas 1055 y 1033 cm^{-1} que corresponden a las vibraciones C-O del metanol, y que se localizan en el intervalo de ~1150 a 1000 cm^{-1} región considerada como la huella dactilar para la identificación del metanol y que se debe a un conjunto único de vibraciones superpuestas complejas de los átomos de la molécula de metanol y que son visiblemente diferenciables de las otras bandas de CO_2 y H_2O (*NIST National Institute of Standards and Technology, Infrared Absorption Spectra of Monohydric A*;National Institute of Standards and Technology).

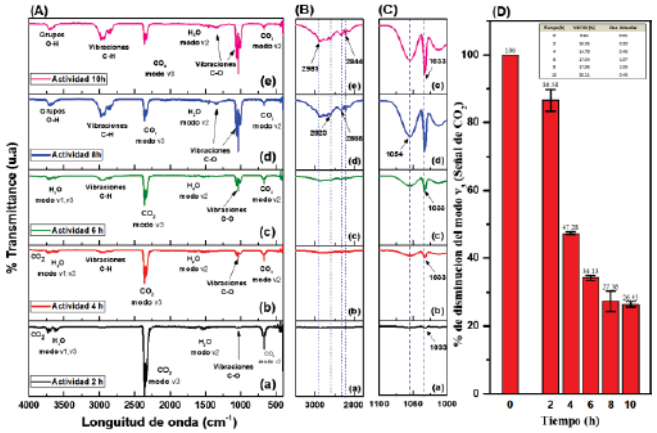


Figura 9. Espectros FT-IR de los subproductos de la reacción fotocatalítica del material con mejor actividad (TiO_2/puntos cuánticos de CdS) con muestreos en varios lapsos de tiempo y su amplificación siguiendo los intervalos importantes de la señal del metanol.

La actividad del material de TiO_2 con puntos cuánticos de CdS mostró los mejores resultados, comparando las señales durante varios intervalos de tiempo de muestreo, se observa una mayor contribución de las señales relacionadas al metanol, con bandas de absorción fuertes en los números de onda 1072 a 1000 cm^{-1} y 1350 a 1260 cm^{-1} y de las vibraciones de estiramiento del enlace C-O así como, una disminución paulatina de las señales de CO_2. Al alcanzar 8 h de ensayo fotocatalítico se interpreta como el final de la actividad fotocatalitica, ya que al cabo de 10 h cuando se toma la última muestra, el espectro FT-IR muestra un minimo cambio, lo que se relaciona con el tope de la actividad fotocatalítica del material. Con el fin de cuantificar la eficiencia alcanzada en el transcurso del tiempo que se llevó el ensayo fotocatalítico, en la Figura 9D, se muestra la eficiencia de conversión porcentual alcanzada de CO_2, junto con la desviación estándar, tomando como referencia la intensidad del modo vibracional ν3 del CO_2 donde al cabo de las 10 horas, se alcanzó una transformación del CO_2 del ~73.6%, una eficiencia sobresaliente en comparación con otros materiales de TiO_2 (Scanlon et al. 2013; Xu et al. 2014; Kozhevnikova et al. 2019) .

Consideramos que el rendimiento fotocatalítico mejorado con el depósito de CdS en los materiales puede atribuirse a 1) absorción de luz mejorada por el comportamiento bifásico, lo que significa que se puede absorber más energía óptica después del depósito de CdS, 2) una contribución mayor del

área superficial de contacto con el CO_2 ; 3) mayor capacidad de adsorción de CO_2, ya que la adsorción de CO_2 es el primer paso esencial para los siguientes procesos de reducción o transformación, y observado por el área superficial de los materiales; 4) separación de carga mejorada debido a la presencia de los puntos cuánticos de CdS como co-catalizador y que muestra corrimientos acial azul. y Otros aspectos como las estructuras cristalinas presentes y la morfología del material con fenómenos de transporte electrónico mejoradas (Kozhevnikova et al. 2019).

5. CONCLUSIONES

Se preparó de manera efectiva un material de dióxido de titanio 1D (nanotubos) con depósito de puntos cuánticos de CdS con procesos consecutivos de síntesis hidrotermal y depositado en películas delgadas sobre sustratos de SiO_2. A través de los métodos de caracterización se verificó la síntesis exitosa de las fases cristalinas y morfologías de los materiales, además, se pudo visualizar otras propiedades importantes como área superficial y ancho de banda de los materiales sintetizados. El depósito de puntos cuánticos de CdS bien dispersos, se observó mediante HRTEM, este depósito mejoró la tasa de transformación de CO_2 a un compuesto como el metanol, alcanzando un rendimiento óptimo de conversión de CO_2 bajo luz UV de un 73.6%. La mejora de la actividad fotocatalítica, se atribuyó a las propiedades de la morfología y la cristalinidad que presento el material, el buen transporte de las cargas fotogeneradas y el desplazamiento bifásico del borde de absorción hacia la región visible, por la presencia de las fases brookita/rutilo. El depósito de los puntos cuánticos de CdS, actuó eficazmente como co-catalizador, promoviendo la separación y el transporte de cargas como se visualizó por el comportamiento de los espectros UV-Vis. Además, de que al realizar el depósito de los materiales en películas delgadas facilito los ensayos fotocatalíticos conservado propiedades importantes como el área superficial y dispersión de los material obre un área mayor de contacto con el gas de CO_2, así como el reusó del sistema para ensayos posteriores de ciclado, lo que da pauta a poder escalar estos materiales a una configuración de reactores con más área de contacto y diferentes configuraciones de arreglos de colimación de fuentes de luz, para explorar otros intervalos del espectro de luz y así determinar otros procesos fotocatálisis en los cuales pueden generarse otros tipos de subproductos de combustibles solares de interés.

AGRADECIMIENTOS

Luis Antonio García-Contreras agradece a SECIHTI por la beca CVU 667265 y Rafael G. Suárez Nájera CVU 557326. Los autores también agradecen al Laboratorio Universitario de Caracterización Espectroscópica (LUCE) y a la Dra. Selene R. Islas por la caracterización UV-Vis; y a la M.Sc. Viridiana Maturano Rojas por la caracterización del método BET; al Dr. Mario R. Rodríguez Varela por su asistencia técnica en pruebas fotocatalíticas (Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, ICAT-UNAM); al Laboratorio Universitario de Microscopía Electrónica (LUME) del Instituto de Investigación en Materiales (IIM-UNAM) y a la M.Sc. Adriana Tejeda Cruz y el Fis. Josué E. Romero I. por su asistencia técnica en la caracterización estructural y morfológica.

REFERENCIAS

Barannik, E.P., Shiryaev, A.A. & Hainschwang, T., 2021, 'Shift of CO2-I absorption bands in diamond: A pressure or compositional effect? A FTIR mapping study', *Diamond and Related Materials*, 113, 108280.

Bavykin, D.V., Lapkin, A.A., Friedrich, J.M. & Walsh, F.C., 2005, 'Acid transformation of TiO2 nanotubes to nanoparticles', 2, 5.

Bellardita, M., Di Paola, A., García-López, E., Loddo, V., Marcì, G. & Palmisano, L., 2013, 'Photocatalytic CO2 Reduction in Gas-Solid Regime in the Presence of Bare, SiO2 Supported or Cu-Loaded TiO2 Samples', *Current Organic Chemistry*, 17(21), 2440–2448.

Camposeco, R., Castillo, S., Mejia, I., Mugica, V., Carrera, R., Montoya, A., Morán-Pineda, M., Navarrete, J. & Gómez, R., 2012, 'Active TiO2 nanotubes for CO oxidation at low temperature', *Catalysis Communications*, 17, 81–88.

Ceballos-Chuc, M.C., Ramos-Castillo, C.M., Alvarado-Gil, J.J., Oskam, G. & Rodríguez-Gattorno, G., 2018, 'Influence of Brookite Impurities on the Raman Spectrum of TiO 2 Anatase Nanocrystals', *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(34), 19921–19930.

Chalastara, K., Guo, F., Elouatik, S. & Demopoulos, G.P., 2020, 'Tunable Composition Aqueous-Synthesized Mixed-Phase TiO2 Nanocrystals for Photo-Assisted Water Decontamination: Comparison of Anatase, Brookite and Rutile Photocatalysts', *Catalysts*, 10(4), 407.

Chen, J., Guan, M., Zhang, X. & Gong, X., 2019, 'Insights into a rutile/brookite homojunction of titanium dioxide: separated reactive sites and boosted photocatalytic activity', *RSC Advances*, 9(63), 36615–36620.

Chen, W.-T., Jovic, V., Sun-Waterhouse, D., Idriss, H. & Waterhouse, G.I.N., 2013, 'The role of CuO in promoting photocatalytic hydrogen production over TiO2', *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(35), 15036–15048.

Chen, Z., Xiong, J. & Cheng, G., 2024, 'Recent advances in brookite phase TiO2-based photocatalysts toward CO2 reduction', *Fuel*, 357, 129806.

Du, P., Niu, P., Yang, Y., Chen, R., Yin, L.-C., Fan, F. & Liu, G., 2022, 'Constructing Anatase–Brookite TiO2 Phase Junction by Thermal Topotactic Transition to Promote Charge Separation for Superior Photocatalytic H2 Generation', *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 13(19), 4244–4250.

Freyria, F.S., Blangetti, N., Esposito, S., Nasi, R., Armandi, M., Annelio, V. & Bonelli, B., 2020, 'Effects of the Brookite Phase on the Properties of Different Nanostructured TiO 2 Phases Photocatalytically Active Towards the Degradation of N-Phenylurea', *ChemistryOpen*, 9(9), 903–912.

García-Contreras, L.A., Flores-Flores, J.O., Arenas-Alatorre, J.Á. & Chávez-Carvayar, J.Á., 2022, 'Synthesis, characterization and study of the structural change of nanobelts of TiO2 (H2Ti3O7) to nanobelts with anatase, brookite and rutile phases', *Journal of Alloys and Compounds*, 166236.

García-Contreras, L.A., Flores-Flores, J.O., Zanella, R., Arenas-Alatorre, J.Á. & Chávez-Carvayar, J.Á., 2025, 'Photocatalytic performance of 1D-TiO2 with flower-like morphology and tunable anatase, brookite, and rutile phases for ibuprofen degradation', *Ceramics International*, 51(28, Part A), 56029–56049.

Gaur, L.K., Kumar, P., Kushavah, D., Khiangte, K.R., Mathpal, M.C., Agrahari, V., Gairola, S.P., Soler, M.A.G., Swart, H.C. & Agarwal, A., 2019, 'Laser induced phase transformation influenced by Co doping in TiO2 nanoparticles', *Journal of Alloys and Compounds*, 780, 25–34.

Ge, M., Cai, J., Iocozzia, J., Cao, C., Huang, J., Zhang, X., Shen, J., Wang, S., Zhang, S., Zhang, K.-Q., Lai, Y. & Lin, Z., 2017, 'A review of TiO 2 nanostructured catalysts for sustainable H 2 generation', *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(12), 8418–8449.

Gleiter, H., 2000, 'Nanostructured materials: basic concepts and microstructure', *Acta Materialia*, 48(1), 1–29.

Gust, D., Moore, T.A. & Moore, A.L., 2009, 'Solar Fuels via Artificial Photosynthesis', *Accounts of Chemical Research*, 42(12), 1890–1898.

He, J., Du, Y., Bai, Y., An, J., Cai, X., Chen, Y., Wang, P., Yang, X. & Feng, Q., 2019, 'Facile Formation of Anatase/Rutile TiO2 Nanocomposites with Enhanced Photocatalytic Activity', *Molecules*, 24(16), 2996.

Henderson, M.A., 2011, 'A surface science perspective on TiO2 photocatalysis', *Surface Science Reports*, 66(6–7), 185–297.

Kaplan, R., Erjavec, B. & Pintar, A., 2015, 'Enhanced photocatalytic activity of single-phase, nanocomposite and physically mixed TiO2 polymorphs', *Applied Catalysis A: General*, 489, 51–60.

Kauffman, K.L., Culp, J.T., Goodman, A. & Matranga, C., 2011, 'FT-IR Study of CO 2 Adsorption in a Dynamic Copper(II) Benzoate−Pyrazine Host with CO 2 −CO 2 Interactions in the Adsorbed State', *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(5), 1857–1866.

Khan, M.A., Nayan, N., Shadiullah, S., Ahmad, M.K. & Soon, C.F., 2020, 'Surface Study of CuO Nanopetals by Advanced Nanocharacterization Techniques with Enhanced Optical and Catalytic Properties', *Nanomaterials*, 10(7), 1298.

Kozhevnikova, N.S., Ul'yanova, E.S., Shalaeva, E.V., Zamyatin, D.A., Bokunyaeva, A.O., Yushkov, A.A., Kolosov, V.Yu., Buldakova, L.Yu., Yanchenko, M.Yu., Gorbunova, T.I., Pervova, M.G., Enyashin, A.N. & Vorokh, A.S., 2019, 'Low-Temperature Sol–Gel Synthesis and Photoactivity of Nanocrystalline TiO2 with the Anatase/Brookite Structure and an Amorphous Component', *Kinetics and Catalysis*, 60(3), 325–336.

Krukowski, E.G., Goodman, A., Rother, G., Ilton, E.S., Guthrie, G. & Bodnar, R.J., 2015, 'FT-IR study of CO2 interaction with Na+ exchanged montmorillonite', *Applied Clay Science*, 114, 61–68.

Liao, Y., Que, W., Jia, Q., He, Y., Zhang, J. & Zhong, P., 2012, 'Controllable synthesis of brookite/anatase/rutile TiO2 nanocomposites and single-crystalline rutile nanorods array', *Journal of Materials Chemistry*, 22(16), 7937.

Liu, C., Chen, J., Che, H., Huang, K., Charpentier, P.A., Xu, W.Z., Shi, W. & Dong, H., 2017, 'Construction and enhanced photocatalytic activities of a hydrogenated TiO 2 nanobelt coated with CDs/MoS 2 nanosheets', *RSC Advances*, 7(14), 8429–8442.

Liu, G., Hoivik, N., Wang, K. & Jakobsen, H., 2012, 'Engineering TiO2 nanomaterials for CO2 conversion/solar fuels', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 105, 53–68.

López, R. & Gómez, R., 2012, 'Band-gap energy estimation from diffuse reflectance measurements on sol–gel and commercial TiO2: a comparative study', *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 61(1), 1–7.

Lyu, J., Zhou, L., Shao, J., Zhou, Z., Gao, J., Li, J., Dong, Y. & Wang, Z., 2020, 'Synthesis of TiO2/H2Ti3O7 composite with nanoscale spiny hollow hierarchical structure for photocatalytic mineralization of VOCs', *Chemical Engineering Journal*, 400, 125927.

Makal, P. & Das, D., 2018, 'Self-doped TiO2 nanowires in TiO2-B single phase, TiO2-B/anatase and TiO2-anatase/rutile heterojunctions demonstrating individual superiority in photocatalytic activity under visible and UV light', *Applied Surface Science*, 455, 1106–1115.

Moya, J.R.G., no date, 'Nanotubos de TiO2 Sensibilizados con Quantum Dots de CdS para Generación de Hidrógeno como Fuente de Energía Renovable.', 35.

National Institute of Standards and Technology, no date, *Methyl Alcohol*.

Niederberger, M. & Cölfen, H., 2006, 'Oriented attachment and mesocrystals: Non-classical crystallization mechanisms based on nanoparticle assembly', *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 8(28), 3271–3287.

Pottier, A., Chanéac, C., Tronc, E., Mazerolles, L. & Jolivet, J.-P., 2001, 'Synthesis of brookite TiO2 nanoparticles by thermolysis of TiCl4 in strongly acidic aqueous media', *Journal of Materials Chemistry*, 11(4), 1116–1121.

Praveen, P., Viruthagiri, G., Mugundan, S. & Shanmugam, N., 2014, 'Structural, optical and morphological analyses of pristine titanium di-oxide nanoparticles – Synthesized via sol–gel route', *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 117, 622–629.

Razali, M.H., Mohd Noor, A.-F., Mohamed, A.R. & Sreekantan, S., 2012, 'Morphological and Structural Studies of Titanate and Titania Nanostructured Materials Obtained after Heat Treatments of Hydrothermally Produced Layered Titanate', *Journal of Nanomaterials*, 2012, 1–10.

Romeiro, A., Azenha, M.E., Canle, M., Rodrigues, V.H.N., Da Silva, J.P. & Burrows, H.D., 2018, 'Titanium Dioxide Nanoparticle Photocatalysed Degradation of Ibuprofen and Naproxen in Water: Competing Hydroxyl Radical Attack and Oxidative Decarboxylation by Semiconductor Holes', *ChemistrySelect*, 3(39), 10915–10924.

Roy, S.C., Varghese, O.K., Paulose, M. & Grimes, C.A., 2010, 'Toward Solar Fuels: Photocatalytic Conversion of Carbon Dioxide to Hydrocarbons', *ACS Nano*, 4(3), 1259–1278.

Rui, Y., Li, Y., Zhang, Q. & Wang, H., 2013, 'Size-tunable TiO2 nanorod microspheres synthesised via a one-pot solvothermal method and used as the scattering layer for dye-sensitized solar cells', *Nanoscale*, 5(24), 12574.

Sadanandam, G., Luo, X., Chen, X., Bao, Y., Homewood, K.P. & Gao, Y., 2021, 'Cu oxide quantum dots loaded TiO2 nanosheet photocatalyst for highly efficient and robust hydrogen generation', *Applied Surface Science*, 541, 148687.

Scanlon, D.O., Dunnill, C.W., Buckeridge, J., Shevlin, S.A., Logsdail, A.J., Woodley, S.M., Catlow, C.R.A., Powell,

M.J., Palgrave, R.G., Parkin, I.P., Watson, G.W., Keal, T.W., Sherwood, P., Walsh, A. & Sokol, A.A., 2013, 'Band alignment of rutile and anatase TiO2', *Nature Materials*, 12(9), 798–801.

Sing, K.S.W., 1985, 'Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984)', *Pure and Applied Chemistry*, 57(4), 603–619.

Stefani, S., Piccioni, G., Snels, M., Grassi, D. & Adriani, A., 2013, 'Experimental CO2 absorption coefficients at high pressure and high temperature', *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 117, 21–28.

Szołdra, P., Frąc, M., Lach, R., Zych, Ł., Radecka, M., Trenczek-Zając, A. & Pichór, W., 2023, 'Effect of brookite on the photocatalytic properties of mixed-phase TiO2 obtained at a higher temperature', *Materials Science and Engineering: B*, 287, 116104.

Tran, H.T.T., Kosslick, H., Ibad, M.F., Fischer, C., Bentrup, U., Vuong, T.H., Nguyen, L.Q. & Schulz, A., 2017, 'Photocatalytic Performance of Highly Active Brookite in the Degradation of Hazardous Organic Compounds Compared to Anatase and Rutile', *Applied Catalysis B: Environmental*, 200, 647–658.

Tripathi, A.K., Mathpal, M.C., Kumar, P., Singh, M.K., Mishra, S.K., Srivastava, R.K., Chung, J.S., Verma, G., Ahmad, M.M. & Agarwal, A., 2014, 'Synthesis based structural and optical behavior of anatase TiO2 nanoparticles', *Materials Science in Semiconductor Processing*, 23, 136–143.

Wetchakun, N., Incessungvorn, B., Wetchakun, K. & Phanichphant, S., 2012, 'Influence of calcination temperature on anatase to rutile phase transformation in TiO2 nanoparticles synthesized by the modified sol–gel method', *Materials Letters*, 82, 195–198.

Xin, X., Xu, T., Wang, L. & Wang, C., 2016, 'Ti3+-self doped brookite TiO2 single-crystalline nanosheets with high solar absorption and excellent photocatalytic CO2 reduction', *Scientific Reports*, 6(1), 23684.

Xu, F., Xiao, W., Cheng, B. & Yu, J., 2014, 'Direct Z-scheme anatase/rutile bi-phase nanocomposite TiO2 nanofiber photocatalyst with enhanced photocatalytic H2-production activity', *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(28), 15394–15402.

Xu, X., Guo, Y., Liang, Z., Cui, H. & Tian, J., 2019, 'Remarkable charge separation and photocatalytic efficiency enhancement through TiO2(B)/anatase hetrophase junctions of TiO2 nanobelts', *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(50), 27311–27318.

Xu, Y., Li, A., Yao, T., Ma, C., Zhang, X., Shah, J.H. & Han, H., 2017, 'Strategies for Efficient Charge Separation and Transfer in Artificial Photosynthesis of Solar Fuels', *ChemSusChem*, 10(22), 4277–4305.

Žerjav, G., Žižek, K., Zavašnik, J. & Pintar, A., 2022, 'Brookite vs. rutile vs. anatase: What`s behind their various photocatalytic activities?', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107722.

Zhang, H. & Banfield, J.F., 2000, 'Understanding Polymorphic Phase Transformation Behavior during Growth of Nanocrystalline Aggregates: Insights from TiO_2', *The Journal of Physical Chemistry B*, 104(15), 3481–3487.

Zhang, X., Wang, Y., Liu, B., Sang, Y. & Liu, H., 2017, 'Heterostructures construction on TiO2 nanobelts: A powerful tool for building high-performance photocatalysts', *Applied Catalysis B: Environmental*, 202, 620–641.

Zhao, J. & Yan, W., 2011, 'Microwave-assisted Inorganic Syntheses', *Modern Inorganic Synthetic Chemistry*, pp. 173–195, Elsevier.

Zhou, W., Liu, H., Boughton, R.I., Du, G., Lin, J., Wang, J. & Liu, D., 2010, 'One-dimensional single-crystalline Ti–O based nanostructures: properties, synthesis, modifications and applications', *Journal of Materials Chemistry*, 20(29), 5993.

Zhu, X., Zhou, Q., Xia, Y., Wang, J., Chen, H., Xu, Q., Liu, J., Feng, W. & Chen, S., 2021, 'Preparation and characterization of Cu-doped TiO2 nanomaterials with anatase/rutile/brookite triphasic structure and their photocatalytic activity', *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(16), 21511–21524.

Zong, X., Yan, H., Wu, G., Ma, G., Wen, F., Wang, L. & Li, C., 2008, 'Enhancement of Photocatalytic H 2 Evolution on CdS by Loading MoS 2 as Cocatalyst under Visible Light Irradiation', *Journal of the American Chemical Society*, 130(23), 7176–7177.

No date, *Sol–gel solvothermal route to synthesize anatase/brookite/rutile TiO2 nanocomposites with highly photocatalytic activity | Journal of Sol-Gel Science and Technology*.

No date, *Highly resolved infrared spectra of pure CO2 ice (15–75 K) | Astronomy & Astrophysics (A&A)*.

No date, *CH3OH espectro infrarrojo de metanol números de onda prominentes cm-1 detección de grupos funcionales hidroxilo huella digital presente para la identificación de metanol alcohol metílico diagrama de imagen notas de revisión de química orgánica avanzada de doc brown*.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Amuzgo textile practice and sustainability in the State of Guerrero, Mexico

Y. López-García* M. Castro-Bello* J. L. Monroy-Gutiérrez ** C. V. Marmolejo-Vega* D. E. Gutiérrez-Valencia* A. Bárcenas-Nava*

**Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Chilpancingo de los Bravo, Gro, 39090 México (Tel: 55-34-83-83-23; e-mail: lg24520608@chilpancingo.tecnm.mx).*

***Facultad de Ciencias Naturales – UAGro, Chilpancingo de los Bravo, Gro. 39086 México (e-mail: monroy38@hotmail.com).*

Abstract: The textile and fashion industries faced significant social, economic, and environmental challenges in the transition to environmentally friendly materials. Within textile production, the processes of fiber spinning, fabric manufacturing, and washing, dyeing, or finishing to add value contravene the principles of environmental viability. The production of textile handicrafts using locally grown cotton and implementing ancestral agricultural practices represents a healthy coexistence with the environment, although it does not favor large-volume production. This research aimed to correlate traditional textile practices with the environment in the Amuzga region of the Costa Chica region of Guerrero State, Mexico. Using a qualitative approach, four methodological phases were developed: 1. Reconnaissance of the Amuzga region: field visits and interviews; 2. Distinguishing textile practices: documentary review and participatory observation; 3. Analysis of dyeing effluents: sampling; and 4. Relationship between textile practices and the environment: descriptive correlational analysis. The results obtained included collaboration with the most prominent cooperative in the most important Amuzga community, the distinction between textile practices: spinning, dyeing, and weaving for their various applications, particularly the huipil; the pH of the dyeing practice showed values between 4 and 7, indicating neutral and slightly acidic discharges without serious impacts on the ecosystem, as materials from nature are used and wastewater is reused without adding chemicals. This corroborates that traditional knowledge is not disconnected from the four pillars of sustainability: environmental, cultural, social, and economic.

Keywords: textiles, amuzgo, spinning, traditional, environment, practices

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el sector textil a escala industrial emite inmensas cantidades de Gases Efecto Invernadero (GEI) durante los procesos productivos: hilado (12 – 31.5%), tejido (23.1 – 29%) y teñido (20 – 25.4%), consumiendo energía, agua y mano de obra en exceso, además de los efluentes cargados de incuantificables productos químicos como tensioactivos, colorantes, compuestos de cloro, sales, peróxidos, fosfatos, productos orgánicos, polímeros y metales pesados como mercurio, cromo, cadmio, plomo o arsénico, por mencionar algunos (Rahaman et al., 2024; Roy et al., 2023; Lara et al., 2022). Se calcula un consumo de 250 a 350 litros de agua para pretratar un kilogramo de tela y 150 para producirla, por lo que Roy et al. (2023) argumentan que el consumo de 93 mil millones de m^3 de agua anuales es debido al crecimiento acelerado del rubro textil, liberando 92 millones de toneladas de residuos y alrededor de cinco millones de toneladas de CO_2, representando aproximadamente una emisión del 10% a nivel mundial. También, Lara et al. (2022) sostienen que una tonelada de tela podría contaminar hasta 200 toneladas de agua.

Una alternativa de sostenibilidad en cuanto al consumo de recursos, generación de emisiones y residuos, es implementar fibras sostenibles y materiales éticos como el algodón orgánico en la producción de prendas de vestir con tendencias de moda lenta que presenten características como mayor duración, que se puedan reparar, reutilizar y reciclar de tal manera que se anule el proceso textil en húmedo o que sea más amigable con el ambiente ya que se recurre a ello para mejorar las propiedades de la fibra con el uso de más químicos que resultan perjudiciales para el medio ambiente (Rahaman et al., 2024; Bianco et al., 2023). Asimismo, la artesanía textil amuzga se ajusta al Plan de Acción Europeo creado por la Unión Europea con la finalidad de que los textiles empleados sean más sostenibles de principio a fin de vida utilizando materiales como el algodón orgánico por ser biodegradable y seguro, ya que es un cultivo que antepone el medio ambiente al tolerar el calor y las sequías. Con sus prácticas sostenibles en la agricultura prioriza el bienestar de agricultores y consumidores eludiendo el uso de productos químicos al valerse de procesos naturales para preservar la fertilidad del suelo y controlar plagas sin la necesidad de implementar procesos húmedos como el blanqueo, mercerizado, acabado o lavado y aun así presenta estabilidad dimensional y aptitud de manejo sobresalientes aminorando el deterioro antropogénico (Rahaman et al.; Adeleke, A., 2024). De la misma manera, es importante acentuar los efectos de los efluentes en el entorno, ya que al fluir desde los campos de cultivo hasta los cuerpos acuíferos pueden afectar directamente a la fauna silvestre y causar eutrofización, además de afectar la flora y, en consecuencia, el hábitat de varias especies contaminando la

gran demanda de tierras necesarias para practicar el cultivo de algodón tradicional (Adeleke, A., 2024).

1.1 Revisión de la literatura

Referente al tema de prácticas textiles, se hallaron algunas investigaciones científicas que permiten tener un panorama más amplio. Por ejemplo, Mishra, P. (2023) durante su investigación de cosechadoras indias describe el proceso productivo algodonero que abarca preparar el campo, sembrar, controlar las malezas, fumigar y cosechar, resaltando esta última como la labor más compleja, retadora y ardua de todas. Adeleke, A. (2024) concuerda con esta calificación al evaluar los avances tecnológicos en la agronomía del algodón reconociendo también la cosecha algodonera como una de las labores más complicadas al realizarla tradicionalmente a mano empleando niños y mujeres hasta el día de hoy solo en países en desarrollo pues los más avanzados como India, China, Estados Unidos, Turquía y Brasil utilizan maquinaria que ayuda a automatizar el proceso convirtiéndolos en los mayores productores de esta fibra. A su vez, el autor destaca como sustituto al cultivo de algodón orgánico para mantener el equilibrio natural del suelo al evitar productos químicos y con esto retener más agua disminuyendo el riego, lo que permite el crecimiento de flora y así se cuida naturalmente el suelo, el ecosistema y la salud de los trabajadores aminorando también el impacto ambiental al ofrecer un producto ético y de calidad.

Para tener un panorama que evalúe el impacto ambiental del algodón, se tienen los trabajos de Roy et al. (2023) que centra su estudio en el algodón reciclado utilizando el Análisis del Ciclo de Vida de la cuna a la puerta para obtener un kilogramo de tela de algodón mediante procesos de hilado, teñido, tejido y acabado con el respectivo consumo de recursos y productos químicos afirmando que la mayor cantidad de GEI es emitida por la producción de fibra y el proceso de hilado sin considerar otras afecciones tóxicas o de déficit ambiental. Del mismo modo Bianco et al. (2023) realizaron el mismo estudio orientado a un metro de lana que incluye desde el pastoreo de las ovejas hasta la obtención de la camiseta obteniendo valores aproximados en cada proceso donde destacan el tejido, corte y costura.

En este contexto, Memon et al. (2022) en su trabajo referente al tejido de Sri Lanka asevera que el hilo de algodón era utilizado para tejer y desde el siglo XX ha resurgido esta tradición que, por sus raíces autóctonas y de gran valor cultural, aporta favorablemente a la sustentabilidad ya que el conocimiento ancestral se fundamenta en el cuidado ambiental y el tejido de telar a mano lo que mantiene viva la cultura coincidiendo con los autores Rahaman et al. (2024) quienes aseveran que el tejido de telar elaborado a mano, como en India y otros países, resguarda las tradiciones fidedignas mermando la alteración ambiental sin consumir energía eléctrica. Aunado a esto, la producción artesanal especializada del algodón durante el hilado y el tejido, demanda tecnologías propias como los husillos, los telares y la mano de obra acreditada para hilar las fibras con torsión Z, distintivas del estilo indio (Fuller et al., 2024).

Con relación a lo anterior, Satybaldieva et al. (2021) afirma que las artesanías tradicionales como el tejido de alfombras reflejan los ámbitos sociales, económicos, imaginarios, psicológicos, artísticos y creativos, por lo que se consideran patrimonio cultural de una nación, portándose en bodas, ceremonias de damas de honor, celebraciones, circuncisiones y funerales. De igual modo, Singh y Rani (2021) manifiestan que los artesanos, tejedores y diseñadores indios destacan por adoptar ingredientes naturales que honren el medio ambiente citando a las técnicas textiles tradicionales como apropiadas para supraciclar los residuos textiles de algodón a través del bordado renovando la estética del artículo imprimiendo la historia, cultura y símbolos naturales como patrones geométricos, aves, mamíferos, señores, diosas, sinagogas, residencias y bueyes, sirviéndose de hilos teñidos de rojo, naranja, morado, verde, amarillo o azul, logrando así la sustentabilidad de la industria textil y de la moda india. Algo semejante es la reflexión que hacen Acquaye et al. (2023) sobre los textiles indígenas africanos occidentales, respecto a su automatización y comercialización debido a la relevancia religiosa, histórica y social que expresan culturalmente. Además, señalan el indicio de estatus, riqueza y prestigio, reconociendo a personajes importantes en ceremonias de iniciación, matrimonio o fallecimiento. No obstante, el portar un estampado igual al del jefe se valora como agravio, lo que derivó en solicitar ropa especial para un evento específico con el compromiso de no replicarlo hasta pasado el hecho, constituyendo una labor sostenible para mujeres marginadas de grupos desfavorecidos que incorporaban símbolos culturales, reflejando la historia e identidad africanas. De esta manera se impulsó su preservación y transmisión a través del tiempo, debido a que estos diseños, colores, materiales y herramientas de las tradiciones textiles ancestrales aportan identidad, diversidad cultural al igual que generan experiencias emocionales, lo que resulta un factor clave para el marketing textil actual que debe presentarse en artículos como colchas, pañuelos, chales, fundas de almohada, cinturones, colchonetas, alfombras, ropa, juguetes suaves, tapicería, cortinas, ropa de cama y cubiertas de cuadernos, todo tejido a mano, transfiriendo la sabiduría de padre a hijo, heredando los principios de conectar la naturaleza con la reciprocidad y el cuidado, vinculando así los cuatro pilares ambientales, culturales, sociales y económicos de la sostenibilidad propiciando el crecimiento comunitario (Memon et al., 2022).

Referente a la práctica del teñido, la industria se ha visto comprometida en incluir prácticas ecológicas ya que para integrar y fijar un colorante a la fibra, hilo, tela, material no tejido o prenda final se aplican químicos, cuando realmente el teñido es un arte de origen histórico por lo que se puede obtener de fuentes naturales, sintéticas o mixtas. Sin embargo, los tintes sintéticos son los más empleados a nivel industrial por la gran variedad de colores, excelente solidez y facilidad para duplicar tonos. Esto hace que la industria consuma alrededor de diez mil toneladas de tintes de las cuales 280 mil toneladas de efluentes tintóreos son descargados como resultado de aproximadamente el 70% de tintes que no logra ser consumido por el textil, volviéndose efluentes que se pueden evaluar en ácidos o alcalinos de acuerdo al valor del

pH que estos arrojen como en un suelo casi neutro con pH = 7 permite mayor captación de carbono lo que se traduce en mejor crecimiento microbiano y al ser un suelo ácido con pH entre uno y seis el mismo crecimiento microbiano demarca la descomposición (Corinaldesi et al., 2024, Malik et al., 2018). En relación a esto, está el consumo energético derivado de la quema de combustibles fósiles que se calcula de acuerdo al tipo de maquinaria, los tratamientos y las cualidades tintóreas lo que determina la inmediatez de mudarse a procesos ecológicos, secos o circulares (Lara et al., 2022).

En cuanto a la producción textil, la historia revela que se involucraba solo a hombres para preparar el suelo y sembrar, mientras que las mujeres se encargaban de la plantación y el deshierbe de los campos algodoneros. En la actualidad, ambos colaboran en la cosecha y las mujeres procesan el algodón hasta antes del tejido, posteriormente, los hombres emplean el telar horizontal a diferencia de las mujeres que utilizan el telar vertical (Seninde et al., 2021). Mishra et al. (2023) comentan que en la India todavía se contrata mano de obra con aproximadamente 500 hombres por hora en cada hectárea logrando recolectar entre 15 y 20 kilogramos de semilla de algodón por día, donde participan del mismo modo hombres y mujeres adultos, lo que incrementa el costo del algodón. Por otra parte, Marcial et al. (2021) reafirman la división de labores por género en el cultivo y el arte textil, actividades que actualmente son compartidas. Adicionalmente, subrayan los conocimientos arcaicos de hombres y mujeres provenientes de pueblos originarios que revelan en su lengua, cosmovisión y el nexo con el ecosistema, ejemplificando cómo los amuzgos (Ñomndaa) mantienen sus técnicas textiles ancestrales a través del tiempo con el cultivo del algodón, el hilado y el tejido en telar de cintura, transmitiendo los saberes de madre a hija y de abuela a nieta, lo que se considera un tiempo para relacionarse, acordar la mezcla de colores y formas que narren su biografía y cosmovisión. Incluso, expone que la sabiduría proviene de las maestras artesanas quienes en su senectud ven la urgencia de rescatar y divulgar las prácticas con las nuevas generaciones con el objetivo de preservarlas y retransmitirlas a otras tejedoras otorgando el valor cultural amuzgo correspondiente.

Actualmente, México sólo identifica a los mixtecos y amuzgos como cultivadores, hilanderos y tejedores de algodón, establecidos en el sureste de Guerrero y Oaxaca, quienes sobresalen por sus actividades agrícolas y la transmisión de saberes que están estrechamente vinculadas con el cuidado ambiental, otorgando plusvalía a los textiles amuzgos que muchas veces no es considerada (Marcial et al., 2021).

En cuanto al impacto social y económico, desarrollaron un proyecto en colaboración con empresas sociales, comerciales y benéficas orientado a mejorar la calidad de vida de artesanos textiles guatemaltecos, registrando la compleja elaboración de artículos textiles para una mejor comprensión. Igualmente, se exhibió la transmisión transgeneracional del tejido maya de madre a hija donde comparten los preparativos, la mezcla de colores, diseños a seguir y la cosmovisión aplicada, con lo que denota ser una labor significativa y fundamental distintiva de la artesanía, la comunidad y la cultura al incrementar las habilidades creativas individuales, los roles de género y el ritual religioso. Además, constituye un espacio seguro de interacción social para compartir conocimientos plasmados en bufandas, bolsas, mantelería, alfombras, fundas de cojines, entre otros (Piper et al., 2023). Respecto a la fabricación de este tipo de artículos en conjunto con la producción de fibra y su comercialización minorista, rebasan los problemas de sostenibilidad, ya que la obtención del algodón crudo es apenas la primera fase del proceso productivo, seguido del desmotado, la limpieza, el hilado, el tejido y cerrando con la confección de una prenda de vestir o un artículo textil que, al ser fabricado con algodón, garantiza la longevidad del producto y del planeta (Mellick et al., 2021).

Fernández Bellver et al. (2023) exponen la participación institucional y gubernamental para favorecer el desarrollo rural a fin de minimizar la migración atribuyendo a las artesanías la generación de empleo, pudiendo servir como sustento regional, incluso plantea que es una actividad más limpia, sostenible y ecológica comparada con la industrial. También destaca el aumento de la investigación científica sobre este tema, encontrando 26 áreas donde las Ciencias Sociales sobresalen con 631 documentos (26.8%) afirmando que el tema de artesanías influye en factores económicos, demográficos, ambientales y de moda para mitigar la pobreza, influir en el desarrollo económico de ciertas regiones, evaluar las variaciones ambientales y la sustentabilidad (Fernández Bellver et al., 2023).

Esta investigación correlaciona las prácticas textiles con el medio ambiente a través de visitas de campo y entrevistas aplicadas en el municipio amuzgo de mayor importancia. Con esto, se lograron distinguir las prácticas textiles de hilado, teñido y tejido mediante revisión documental científica obteniendo trabajos que hacen mención de los procesos realizados en varias partes del mundo. La observación participativa permitió recopilar información ancestral como el modo de obtención de materias primas y un mejor entendimiento de cada práctica. Para el análisis de efluentes tintóreos se tomaron muestras de cada baño, evaluando el pH del día de la práctica y el día siguiente. Con todo lo anterior, se realizó un análisis descriptivo correlacional obteniendo un resultado favorable para la conservación de la fertilidad en el suelo y el medio ambiente.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Los materiales utilizados en esta investigación fueron una cámara Go Pro max 360, teléfono celular iPhone 8 plus, estabilizador dji, cuestionarios en Google Forms, software QGIS, vasos para muestra clínica y tiras medidoras de pH grado académico.

2.2 Metodología

Este proyecto implementó visitas de campo para recopilar material fotográfico y de video en cada una de las fases expuestas en el esquema metodológico, Figura 1 (Piper et al., 2023). Además, se realizó la observación participativa durante

el desarrollo de la investigación con la finalidad de identificar oportunidades de mejora en las prácticas amuzgas desarrolladas. La elección de entrevistas semiestructuradas se hizo con el objetivo de reunir historias verídicas contadas directamente por las artesanas para obtener respuestas detalladas (Hassan, R., 2025). Adeleke, A. (2024), Bianco et al. (2023). y Lara et al. (2022) enfatizan en repetidas ocasiones la problemática ocasionada por los efluentes tintóreos industriales ampliamente cargados de químicos culminando en los cuerpos de agua y causando principalmente la eutrofización que resulta de la acidificación en los vertidos, razón por la que se decidió medir el pH de estos efluentes artesanales con el propósito de evaluar acidez o alcalinidad en la solución que derive en impacto ambiental.

Figura 1. Esquema metodológico.

2.2.1 Reconocimiento de la zona

Para conocer la zona amuzga donde ponen en ejecución las prácticas textiles, se realizaron ocho visitas a la primera cooperativa del municipio "La Flor de Xochistlahuaca" donde se llevó a cabo la presentación del proyecto a dos líderes amuzgas, reconocidas tejedoras expertas que hablan el idioma español a quienes se les solicitó su colaboración para recopilar información mediante la aplicación de entrevistas semiestructuradas. Asimismo, se elaboró un mapa del área de estudio, Figura 2.

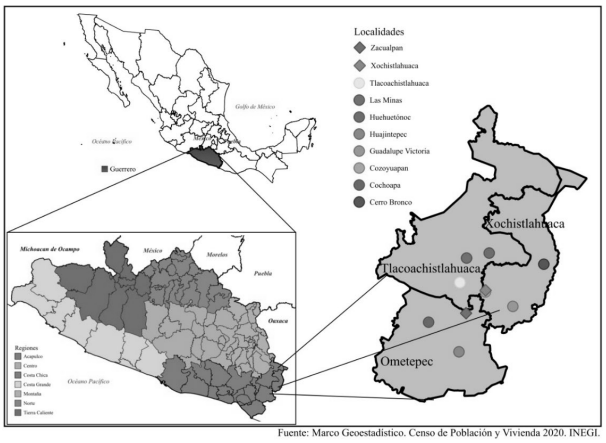


Figura 2. Zona amuzga del Estado de Guerrero, México.

2.2.2 Distinción de las prácticas textiles tradicionales

Para identificar las prácticas textiles se realizó una revisión documental y observación de los procesos de hilado, teñido y tejido en telar de cintura para registrar datos, imágenes y videos trascendentales alusivos a estas técnicas, Figura 3, 4 y 5.

Figura 3. Hilado a mano con fibra de algodón blanco de la región.

Figura 5. Tejido tradicional en telar de cintura.

Figura 4. Teñido tradicional.

2.2.3 Análisis de efluentes tintóreos

El análisis de efluentes consistió en recolectar cuatro muestras de los diferentes baños de teñido para evaluar el pH después de haber culminado el proceso y dejando enfriar las muestras. Posteriormente, en veinticuatro horas se midió el pH para identificar algún cambio, no obstante, fueron no significativos. Los valores obtenidos se contrastaron con el pH neutro del agua pura (pH=7), Figura 6 y 7.

Figura 6. Muestras de aguas residuales tintóreas.

Figura 7. Medición del pH.

2.2.4 Relación entre prácticas y medio ambiente

Para conocer este tipo de prácticas que realizan las tejedoras amuzgas, se elaboraron entrevistas semiestructuradas referente a los procesos del algodón después de la cosecha, así como del manejo y vertido de residuos. Posteriormente, se hizo un análisis correlacional cualitativo entre prácticas y medio ambiente.

3. RESULTADOS

Los resultados derivados de la primera fase de esta investigación permitieron reconocer a la localidad de Xochistlahuaca como la de mayor importancia en la región amuzga, afamada a nivel mundial por sus prendas artesanales. Se estableció un acuerdo de colaboración con la primera cooperativa legalmente constituida "La Flor de Xochistlahuaca", Figura 8.

Figura 8. Presentación del proyecto.

Las prácticas textiles que se distinguieron durante la revisión documental se confirmaron con las visitas de campo y son el hilado, la primera práctica posterior a la cosecha del algodón endémico que se apoya del conocimiento heredado y el uso de herramientas específicas para su correcta ejecución; el teñido como segunda práctica textil realizada con tintes obtenidos a partir de la biodiversidad del entorno local sin aditamentos químicos; y finalmente, el tejido como tercera práctica la cual es desarrollada en el telar de cintura la cual es la herramienta básica para elaborar artículos textiles artesanales como el huipil, los manteles de mesa y las servilletas, principalmente, Figura 9.

Figura 9. Blusa tejida en telar de cintura.

La medición del pH arrojó valores con diferencias mínimas entre las cuatro muestras y de un día para otro, Tabla 1.

Tabla 1. Valores generales de pH

pH de teñidos		
Teñido	**pH**	**Interpretación**
Día 1	5-7	Ligeramente ácidos y neutros sin afectaciones graves al ecosistema
Día 2	4-7	

En cuanto a la relación entre las prácticas textiles tradicionales y el medio ambiente con base en el manejo y vertido de residuos durante y después del proceso textil, se observó que la materia prima utilizada en el hilado es el algodón cultivado localmente cuyos residuos son mínimos incuantificables, dado que las fibras se dispersan en el ambiente en cantidades reducidas. El teñido se realiza con tintes naturales extraídos de flores, tallos o frutos del ecosistema local (zapote, flor de jamaica, cúrcuma, entre otros) y aguas residuales del mismo proceso húmedo. Los retazos de tejido sobrantes de las prendas se reciclan en otros artículos artesanales de menor tamaño o como relleno, Tabla 2, Figura 10.

Tabla 2. Relación entre prácticas y medio ambiente.

Prácticas textiles y medio ambiente			
Práctica	**Materia Prima**	**Residuos**	**Correlación**
Hilado	Algodón natural	Mínimo incuantificable	Sin afectar al medio ambiente
Teñido	Tintes naturales	Reutilización	Impacto tóxico casi nulo
Tejido	Telar de cintura	Reciclado	Sin causar daños ambientales

Figura 10. Monederos elaborados con retazos.

Con lo anterior, se puede constatar que las artesanas al utilizar materiales orgánicos provenientes de la naturaleza y su sabiduría arcaica disminuyen el impacto tóxico al medio ambiente.

4. DISCUSIÓN

Este proyecto evidencia que los productos textiles amuzgos se elaboran con fibra sostenible como es el algodón endémico, creando productos atemporales que se pueden reparar, reutilizar y reciclar, tal como lo mencionan Bianco et al. (2023). Las tejedoras amuzgas demuestran que el algodón local es un cultivo orgánico al suministrar productos naturales para prevenir plagas, utilizando agua de lluvia para el riego del cultivo, priorizando de esta manera el bienestar del agricultor y del medio ambiente coincidiendo con Adeleke, A. (2024).

Los datos obtenidos demuestran que las prácticas textiles tradicionales son amigables con el ecosistema, ya que la población amuzga cuida cada proceso productivo desde el cultivo del algodón hasta la obtención de la prenda final. Caso contrario de Lara et al. (2022) y Rahaman et al. (2024) quienes reportan datos cuantitativos relevantes de la contaminación textil a nivel industrial.

5. CONCLUSIÓN

El sector textil artesanal demuestra que el conocimiento ancestral no ha quedado obsoleto gracias a su eficiencia, sustentabilidad y la implicación cultural que representa no solo para la zona amuzga sino para todo el mundo. Las prácticas textiles amuzgas son un reflejo de su cosmovisión al relacionarse con la naturaleza preservando sus prácticas, lo que garantiza el cuidado del medio ambiente y la preservación del patrimonio cultural. Con este documento se le concede el poder de elegir el conocimiento ancestral a las generaciones venideras.

REFERENCIAS

Acquaye, R., Sawyerr, N. O., & Seidu, R. K. (2023). Reinventing indigenous West African fabric design for contemporary commercial application. *Journal of Urban Culture Research,* 27, 261-276.

Adeleke, A. (2024). Technological advancements in cotton agronomy: a review and prospects.

Bianco, I., De Bona, A., Zanetti, M., & Panepinto, D. (2023). Environmental Impacts in the Textile Sector: A Life Cycle Assessment Case Study of a Woolen Undershirt. *Sustainability*, *15*(15), 11666. https://doi.org/10.3390/su151511666

Fernández Bellver, D., Prados-Peña, M. B., García-López, A. M., & Molina-Moreno, V. (2023). Crafts as a key factor in local development: Bibliometric analysis. *Heliyon,* 9 (1), e13039.

Fuller, D. Q., Champion, L., Castillo, C. C., & den Hollander, A. (2024). Cotton and post-Neolithic investment agriculture in tropical Asia and Africa, with two routes to West Africa. *Journal of Archaeological Science: Reports,* 57, 104649.

Lara, L., Cabral, I., & Cunha, J. (2022). Ecological approaches to textile dyeing: a review. *Sustainability*, 14(14), 8353.

Marcial, H. F., Romero, D. M. Q., & López, R. (2021). El cuidado de la naturaleza desde el arte textil amuzgo. *Sociedad, permacultura y agricultura sustentable.*

Mellick, Z., Payne, A., & Buys, L. (2021). From fibre to fashion: Understanding the value of sustainability in global cotton textile and apparel value chains. *Sustainability*, 13(22), 12681.

Memon, H., Ranathunga, G. M., Karunaratne, V. M., Wijayapala, S., & Niles, N. (2022). Sustainable textiles in the past "wisdom of the past: Inherited weaving techniques are the pillars of sustainability in the handloom textile sector of Sri Lanka". *Sustainability*, 14(15), 9439.

Mishra, P. K., Sharma, A., & Prakash, A. (2023). Current research and development in cotton harvesters: A review with application to Indian cotton production systems. *Heliyon*, 9(5).

Piper, A., Townsend, K., & Jabur, L. (2023). Resilience, resourcefulness and creativity: Learning from the diversification of guatemalan artisans during the pandemic to sustain textile traditions. *Journal of Textile Design Research and Practice,* 11(1-2), 34-60.

Rahaman, M. T., Pranta, A. D., Repon, M. R., Ahmed, M. S., & Islam, T. (2024). Green production and consumption of textiles and apparel: Importance, fabrication, challenges and future prospects. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(2), 100280.

Roy, S., Chu, Y. Y. J., & Chopra, S. S. (2023). Life cycle environmental impact assessment of cotton recycling and the benefits of a Take-Back system. *Resources, Conservation & Recycling Advances,* 19, 200177.

Satybaldieva, C., Tashalieva, M., Eshnazarova, Z., Tagaibekova, A., Satybaldieva, A., Tashalieva, Z., & Abdullaeva, Z. (2021). Traditional Kyrgyz Carpet Weaving Process and Semantics of Related Customs. *Advances in Anthropology,* 11(01), 68.

Seninde, D. R., Chambers IV, E., Chambers, D. H., & Chambers V, E. (2021). Development of a Consumer-Based Quality Scale for Artisan Textiles: A Study with Scarves/Shawls. *Textiles*, 1(3), 483-503.

Singh, S., & Rani, J. (2021). Traditional Indian textile techniques used to upcycle and recycle textile waste. *Textile & Leather Review,* 4, 336-353.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Earthworm Humus: Biology, Technology, and Opportunities for a Sustainable Fertilizer

Tlaloc González Sánchez * **Gloria Lilia Osorio Gordillo** *
Jorge Yusef Colín Castillo *
Rodolfo Amalio Vargas Méndez *

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.*
E-mail: d22ce076@cenidet.tecnm.mx

Abstract: Vermicomposting represents a sustainable biotechnological strategy for organic waste management, converting it into high-quality humus that enhances soil fertility and structure. Earthworm biology is central to this process, where maintaining a balance between population density, biomass, and degradation efficiency is crucial for system stability. This study identifies and discusses the main areas of opportunity for advancing vermicomposting, particularly the challenges associated with manual control of process parameters, overpopulation, and the lack of standardized large-scale systems. Emerging technologies—such as automation, sensors, microcontrollers, and artificial intelligence—offer promising solutions through real-time monitoring, predictive modeling, and process optimization. However, most initiatives remain at prototype or experimental stages. Strengthening research in integrated automation, renewable energy applications, and automated harvesting systems is essential to scale up vermicomposting. The convergence of biology, engineering, and digital technologies could enhance efficiency, reproducibility, and contribute to the Sustainable Development Goals, especially SDG 15.3 on restoring degraded soils and protecting terrestrial ecosystems.

Keywords: vermicomposting, humus, automation, sustainability, sensors, artificial intelligence, SDGs, Earthworm density, Soil restoration.

1. INTRODUCCIÓN

Numerosos agricultores reconocen la presencia de lombrices como un indicador clave de la calidad del suelo. Estos organismos cumplen una función esencial en la dinámica edáfica al favorecer procesos biológicos y físico-químicos que resultan determinantes para la productividad agrícola. Diversos estudios han documentado sus beneficios, entre los que destacan el incremento de la fertilidad, la mejora de la estructura del suelo y el aumento en su capacidad de retención de agua. A través de la descomposición de la materia orgánica y la generación de canales en el sustrato, las lombrices no solo enriquecen los nutrientes disponibles para las plantas, sino que también optimizan la aireación y el drenaje, siendo estos elementos críticos para la salud de los cultivos ((Shipitalo and Gibbs, 2000),(Tomlin and Protz, 1995)). En este sentido, las lombrices de tierra constituyen un componente biológico fundamental y, al mismo tiempo, una herramienta natural con gran potencial para impulsar prácticas agrícolas alineadas con los principios del desarrollo sostenible.

Con el propósito de superar las limitaciones que presentan los métodos tradicionales de manejo de lombrices y de producción de vermicompost, en los últimos años se han impulsado distintas iniciativas orientadas hacia la automatización de estos procesos. La incorporación de sensores, microcontroladores e incluso tecnologías basadas en el Internet de las Cosas (IoT) ha permitido mejorar el monitoreo de parámetros como humedad, temperatura y pH, factores decisivos para el rendimiento de las lombrices y la calidad del humus obtenido. Sin embargo, los sistemas desarrollados hasta la fecha aún requieren intervenciones manuales, lo que restringe su eficiencia, incrementa los costos operativos y limita su escalabilidad ((Barcelon et al., 2019),(Embalzado et al., 2019),(Gavilanes et al., 2024a),(Monroy and Esquivel, 2021),(Usha et al., 2024),(Vijayalakashmi et al., 2022)).

En este contexto, resulta indispensable concebir el vermicompostaje no solo como un proceso biológico tradicional, sino como un campo con potencial de innovación tecnológica. El diseño de sistemas automatizados que integren monitoreo en tiempo real, control adaptativo de las condiciones del sustrato y separación mecánica del humus podría transformar esta práctica en una alternativa sostenible, eficiente y adaptable a diferentes escalas productivas. Así, las lombrices no solo deben ser reconocidas como agentes clave en la regeneración de suelos, sino también como un eje central en la transición hacia modelos agrícolas más sostenibles y tecnológicamente avanzados ((Brown et al., 2000)).

2. BIOLOGÍA DE LAS LOMBRICES Y SU PAPEL EN EL VERMICOMPOSTAJE

2.1 Clasificación de las lombrices

Desde una perspectiva ecológica, las lombrices de tierra se clasifican en distintos grupos funcionales, definidos por sus hábitos alimenticios, patrones de movilidad en el suelo y funciones dentro del ecosistema edáfico. Esta clasificación resulta fundamental para comprender la magnitud de su impacto en procesos clave como la descomposición de la materia orgánica, el ciclado de nutrientes, la regulación de la estructura del suelo y, en última instancia, la productividad agrícola.

Los tres grupos ecológicos principales son:

- **Epigeas**: Habitan en la superficie del suelo, particularmente en la hojarasca y en residuos orgánicos en descomposición. No construyen galerías permanentes, ya que su actividad se concentra en las capas superficiales. Destacan por su alta eficiencia en la transformación de materia orgánica fresca en humus estable, lo que las convierte en las especies más utilizadas en sistemas de vermicompostaje. Además, presentan una elevada tasa de reproducción y consumo, características que permiten su aprovechamiento en escalas tanto domésticas como industriales. Un ejemplo representativo es *Eisenia fetida*, conocida comúnmente como lombriz roja californiana.
- **Endogeas**: Viven principalmente en los horizontes minerales del suelo, donde construyen galerías horizontales. Su dieta consiste en una mezcla de materia orgánica con suelo, lo que contribuye directamente a la formación de agregados y a la mejora de la estructura edáfica. Aunque son menos visibles en superficie, desempeñan un papel esencial en la bioturbación, la estabilización de agregados y la redistribución de nutrientes, procesos que favorecen la fertilidad natural y la resiliencia de los sistemas agrícolas.
- **Anécicas**: Se caracterizan por la construcción de galerías verticales profundas que conectan la superficie con capas subterráneas. Se alimentan de restos orgánicos superficiales, los cuales transportan el compuesto orgánico más profundo. Este comportamiento facilita la mezcla vertical del suelo y potencia procesos como la aireación, el drenaje y la disponibilidad de nutrientes a mayor profundidad. Gracias a ello, las anécicas contribuyen a mejorar la capacidad de infiltración del agua y a reducir la compactación del suelo.

Cada uno de estos grupos desempeña funciones ecológicas complementarias que, en conjunto, determinan la calidad, estabilidad y funcionalidad del ecosistema suelo. Comprender sus dinámicas no solo es relevante para la ecología y la agricultura convencional, sino también para el diseño de sistemas innovadores que integren el vermicompostaje automatizado. De este modo, la clasificación funcional de las lombrices ofrece una base científica sólida para optimizar el uso racional de los recursos orgánicos y avanzar hacia modelos productivos más sostenibles y tecnológicamente adaptados a los desafíos actuales ((Ríos, 2005)).

2.2 Efecto de las lombrices sobre las propiedades del suelo

En los últimos años han señalado que la pérdida acelerada de materia orgánica y la degradación de los suelos agrícolas están estrechamente vinculadas con la disminución o eliminación de la fauna edáfica encargada de regular procesos clave como la descomposición, la estructuración y el reciclaje de nutrientes. Entre estos organismos, las lombrices de tierra destacan por su papel determinante en la mejora de múltiples propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Las lombrices anécicas, como Lumbricus terrestris, excavan galerías verticales profundas que incrementan la porosidad del suelo, facilitan el flujo de agua a través del perfil edáfico y promueven el transporte de nutrientes y agroquímicos hacia las capas profundas. Esta actividad también mejora la infiltración y reduce el riesgo de escorrentía superficial, favoreciendo así un uso más eficiente del agua y de los fertilizantes.

Por su parte, las especies epigeas desempeñan un papel crucial en la fragmentación y mineralización de residuos orgánicos presentes en la superficie, acelerando su transformación en compuestos disponibles para las plantas. Las lombrices endógenas, en cambio, consumen materia orgánica parcialmente descompuesta y la mezclan con partículas minerales del suelo, lo que contribuye a la formación de agregados estables, mejora la estructura del suelo y promueve un entorno favorable para las raíces ((Brown et al., 2000)).

Cabe destacar que las propias lombrices actúan como agentes de bioturbación, ya que transportan partículas de suelo desde capas profundas hacia la superficie y viceversa, lo cual, a lo largo del tiempo, puede inducir cambios significativos en la mineralogía y composición química de los horizontes superficiales. Este conjunto de funciones convierte a las lombrices en agentes clave para la restauración, conservación y productividad de suelos agrícolas, y su inclusión en sistemas de producción sustentables representa una estrategia prometedora para mitigar los efectos de la degradación edáfica ((Lavelle et al., 1996)).

2.3 Ciclo de reproducción de las lombrices

Las lombrices de tierra son organismos hermafroditas que presentan gónadas localizadas en segmentos específicos de su cuerpo, cuya posición varía según el grupo taxonómico al que pertenecen. Al alcanzar la madurez sexual desarrollan una estructura glandular externa denominada clitelo, la cual desempeña un papel fundamental en la reproducción, ya que se encarga de secretar el material necesario para la formación de cápsulas o cocones. En estos cocones se depositan uno o varios huevos, que son desplazados hacia los segmentos anteriores del cuerpo y liberados posteriormente en el suelo. Dentro de estas cápsulas ocurre el desarrollo embrionario, de donde emergen los juveniles que completan allí sus primeras fases de crecimiento y salen posteriormente al exterior con una morfología similar a la del adulto, aunque aún inmaduros sexualmente.

El ciclo de vida de las lombrices se inicia con la formación de estos capullos y se extiende hasta su muerte, pasando por diferentes etapas que incluyen el nacimiento, crecimiento, maduración sexual, reproducción y longevidad. La duración de cada fase depende de la especie, así como de factores ambientales como temperatura, humedad y disponibilidad de alimento. Generalmente, las lombrices alcanzan la madurez en pocas semanas o meses, lo que les permite mantener poblaciones estables y adaptarse con rapidez a su entorno. La longevidad puede variar desde algunos meses hasta varios años, influyendo directamente en la dinámica de las comunidades edáficas y en los servicios ecosistémicos que se encuentran, como la aireación del suelo, la descomposición de materia orgánica y la mejora de la fertilidad. Tal como se sintetiza en la Fig. 1, este ciclo vital abarca desde la formación del capullo hasta la mortalidad, con diferencias notables según la especie considerada ((Ríos, 2005)).

Categoría	Tasa de reproducción de capullos/dia.	Viabilidad de eclosión (%)	Tiempo de incubación (días)	Número de descendientes por capullo	Tiempo máximo de vida (años)
Epigeas	3 - 5	72-82	18-26	3-4	1-2
Endógeas	1 - 3	60-75	20-35	2-4	2-5
Anécicas	7-20	70-85	25-40	1-3	4-8

Fig. 1. Ciclo de vida de las lombrices.

2.4 Condiciones adecuadas para mantener un equilibrio entre reproducción y eficiencia de degradación.

Las condiciones de equilibrio en un sistema de vermicompostaje son un factor determinante, ya que influyen de manera directa en la reproducción, el crecimiento y la eficiencia de degradación de las lombrices. La regulación adecuada de parámetros como humedad, temperatura, densidad poblacional y disponibilidad de alimento permite evitar situaciones de estrés que pueden reducir la tasa de crecimiento o incluso provocar la mortalidad de los organismos. Mantener estos factores dentro de rangos adecuados asegura no solo la estabilidad del ecosistema biológico, sino también la continuidad del proceso de transformación de residuos en un producto de valor agregado.

En este sentido, resulta esencial establecer márgenes de control que permitan sostener un ritmo reproductivo constante, un incremento saludable en las lombrices y una conversión eficiente de la materia orgánica en humus de calidad. Como se muestra en la fig. 2, existen condiciones tanto favorables como desfavorables que determinan el desempeño de la población. Mientras los parámetros adecuados favorecen un desarrollo vigoroso y una mayor capacidad de procesamiento, los valores inadecuados pueden desencadenar estrés fisiológico, reducción en la tasa reproductiva e incluso mortalidad masiva. Comprender estas condiciones críticas no solo contribuye a la salud de las lombrices, sino que también asegura la productividad y el rendimiento global del sistema de vermicompostaje ((Barrón-Bravo et al., 2024)).

Categoría	Condiciones adecuadas de crecimiento	Factores de eliminación
Epigeas	• Temperatura 15-25°C (máx. tolerable 30°C. • Humedad 70-90%. • pH: 6.5 - 7.5 • Ambiente: capa superficial con abundante materia orgánica.	• Temperaturas (<5 °C o >35 °C) • Sequedad del sustrato • pH ácido (<5) o alcalino (>9) • Exceso de sales o sustancias tóxicas (metales pesados, detergentes) • Depredadores (hormigas, aves, ácaros)
Endógeas	• Temperatura: 10 – 20 °C • Humedad: 60 – 80 % • pH: 5,5 – 8 • Ambiente: capas intermedias del suelo (galerías horizontales)	• Suelo compactado en exceso • Sequías o inundaciones prolongadas • Contaminación por fertilizantes y plaguicidas • Temperaturas extremas (<5 °C o >30 °C)
Anécicas	• Temperatura: 10 – 20 °C • Humedad: 50 – 70 % • pH: 6 – 8 • Ambiente: suelos profundos y bien estructurados, con galerías verticales permanentes	• Labranza intensiva (destrucción de galerías) • Agroquímicos en exceso • Sequías prolongadas (aunque pueden enterrarse más profundo) • Inundaciones (falta de oxígeno) • Temperaturas extremas (<0 °C o >30 °C)

Fig. 2. Condiciones adecuadas e inadecuadas para las lombrices.

2.5 La materia orgánica y ciclos de los nutrientes

La actividad biológica de las lombrices de tierra desempeña un papel fundamental en la dinámica del suelo, ya que aceleran la descomposición de los residuos vegetales, incrementando la transformación y la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas. Asimismo, favorecen procesos físicos clave como la formación de agregados, el aumento de la porosidad, la mejora en la infiltración de agua y el transporte de elementos orgánicos a lo largo del perfil edáfico.

Desde una perspectiva biogeoquímica, estos organismos ejercen una gran influencia en el ciclo de los nutrientes, en especial en el ciclo del carbono. Su actividad puede intensificar la mineralización del carbono, facilitando su absorción por las plantas; no obstante, en ciertos casos también contribuyen a su estabilización, al promover la formación de agregados estables donde el carbono queda físicamente protegido de la descomposición microbiana, funcionando así como reservorios de carbono orgánico en el suelo.

Un aspecto particularmente relevante es la composición de sus excretas, comúnmente conocidas como vermicompost o turba de lombriz. Estas contienen concentraciones considerablemente más altas de nitrógeno orgánico en comparación con el suelo circundante, lo que incrementa la fertilidad edáfica y puede disminuir la dependencia de fertilizantes sintéticos en los sistemas agrícolas.

En conjunto, estos efectos posicionan a las lombrices de tierra como organismos clave para la sostenibilidad de los agroecosistemas, no solo por su capacidad de reciclar materia orgánica, sino también por su aporte a la eficiencia en el uso de nutrientes, la mejora de la estructura del suelo y la retención de carbono frente a la descomposición. Todo ello las convierte en aliadas estratégicas en el contexto del cambio climático y la seguridad alimentaria.

2.6 Propiedades físicas del suelo

El impacto de las lombrices de tierra sobre la estructura del suelo es el resultado combinado de su actividad alimenticia y de construcción de madrigueras. Durante su proceso de alimentación, las lombrices ingieren partículas minerales junto con materia orgánica. Esta mezcla es procesada y

excretada en forma de coprolitos, también conocidos como excretas. Estos coprolitos pueden ser arrastrados por el agua de lluvia y contribuir a la erosión superficial, o bien estabilizarse y formar agregados sólidos, gracias a diversos mecanismos físico-químicos y biológicos que mejoran la cohesión del suelo.

Sin embargo, algunos efectos pueden ser contraproducentes en contextos específicos. Por ejemplo, ciertas especies tropicales pueden reducir la infiltración al producir coprolitos que compactan la capa superficial del suelo. Además, la actividad de algunas lombrices puede incrementar la erosión, especialmente cuando remueven la cobertura de residuos orgánicos que protege la superficie, sellan la capa superior o depositan coprolitos en zonas expuestas a lluvias intensas.

A pesar de estas excepciones, el consenso científico señala que las lombrices son, en general, organismos beneficiosos y esenciales para la mejora estructural del suelo. Su inclusión en estrategias de manejo sustentable del suelo representa una alternativa biológica eficiente para restaurar ecosistemas agrícolas degradados y potenciar la productividad bajo principios de sostenibilidad ((Ríos, 2005)).

2.7 Crecimiento de las plantas

Se han reportado resultados positivos; sin embargo, también se han documentado casos con efectos neutros o incluso negativos, lo cual sugiere que su influencia puede variar dependiendo del contexto edáfico, la especie vegetal, las condiciones ambientales y las características de la comunidad de lombrices involucradas.

En condiciones de laboratorio, invernadero y campo, se ha observado que la presencia de lombrices puede inducir un aumento significativo en la producción de biomasa aérea, el número de retoños y la producción de granos en distintos cultivos. Un caso notable se reportó en Nueva Zelanda, donde la introducción de lombrices en pastizales degradados generó un aumento sustancial tanto en la cantidad como en la calidad del forraje cosechado ((Ríos, 2005)), evidenciando su potencial agronómico en sistemas extensivos.

Estos hallazgos refuerzan el valor ecológico y agronómico de las lombrices en sistemas de producción sustentable, y justifican su integración en estrategias agroecológicas orientadas a reducir insumos químicos y mejorar la salud del suelo y de los cultivos.

2.8 Origen y selección de Eisenia andrei (Lombriz roja californiana)

En tiempos más recientes, se han realizado estudios científicos orientados al mejoramiento genético de lombrices para su uso en procesos de compostaje. Fue en 1933 cuando investigadores estadounidenses iniciaron trabajos sistemáticos de selección de lombrices pertenecientes a las especies Lumbricus terrestris L. y Eisenia foetida. Como resultado de estos estudios, en 1954 se obtuvo un híbrido que posteriormente sería conocido como Lombriz Roja Californiana (Eisenia andrei), el cual se ha convertido en una de las especies más utilizadas a nivel mundial en sistemas de vermicompostaje.

La popularidad de esta especie se debe a su alta eficiencia en la transformación de desechos orgánicos en abono de calidad, así como a su adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales, rápida tasa de reproducción y resistencia a fluctuaciones en los parámetros físico-químicos del sustrato. Estas características hacen que la Lombriz Roja Californiana sea ideal para sistemas tanto domésticos como industriales, contribuyendo significativamente a la gestión sustentable de residuos y a la producción de fertilizantes orgánicos de alto valor agronómico ((Domínguez and Gómez-Brandón, 2010)).

3. EL HUMUS DE LOMBRIZ: PROCESOS Y BENEFICIOS

El vermicompostaje se reconoce como una técnica eficiente para el tratamiento de residuos orgánicos, caracterizada por su bajo impacto ambiental y su capacidad para transformar desechos en un recurso de valor agregado. Numerosos estudios han demostrado que este proceso no solo reduce significativamente el volumen de residuos, sino que además contribuye a la producción de un fertilizante orgánico rico en nutrientes, capaz de mejorar la calidad del suelo y promover la sostenibilidad agrícola. No obstante, a pesar de sus beneficios, la mayoría de las aplicaciones actuales presentan limitaciones relacionadas con la eficiencia del proceso, la reproducibilidad de los resultados y la escalabilidad de los sistemas implementados, lo que dificulta su aprovechamiento a gran escala.

En este contexto, uno de los aspectos críticos en la evaluación del vermicompostaje es la calidad del humus obtenido. Como se observa en la fig. 3, dicha calidad depende principalmente de los porcentajes de materia orgánica presentes, lo cual determina su potencial como fertilizante natural. Un contenido adecuado de materia orgánica asegura propiedades como mayor retención de humedad, disponibilidad de nutrientes y mejora de la estructura edáfica, mientras que valores inadecuados pueden limitar su efectividad en campo. Por tanto, garantizar un equilibrio en estos parámetros resulta fundamental para obtener un producto final que cumpla con los estándares y pueda integrarse en prácticas agrícolas sustentables ((González-Márquez et al., 2021)).

4. AVANCES TECNOLÓGICOS EN EL VERMICOMPOSTAJE

Diversos estudios han explorado la automatización de procesos biológicos mediante el uso de sensores, microcontroladores y plataformas de monitoreo, logrando avances significativos en la digitalización y control de sistemas productivos ((Gavilanes et al., 2024b), (Reddy et al., 2024), (Raghunath et al., 2025), (Aquino et al., 2019), (Bagali et al., 2021), (Shalini et al., 2022)). Estas tecnologías permiten registrar en tiempo real parámetros críticos, optimizar el uso de recursos y generar modelos predictivos capaces de anticipar problemas o ajustar condiciones

Parámetro	Qué significa	Valores deseables / referencia	Interpretación
Materia orgánica (%)	Fuente de carbono, energía y alimento para microorganismos	>= 50%	Humus joven, rico en carbono y actividad biológica
Ceniza (%)	> 50% (perdida por calcinación)	30-50%	Aporta nutrientes al suelo. >70% humus "pobre"
Balance ideal	Proporción entre orgánico e inorgánico	Materia orgánica >50% y ceniza <50%	Humus equilibrado: rico en C y nutrientes minerales.

Fig. 3. Porcentajes adecuados para un humus de calidad.

de operación, incrementando así la eficiencia y la reproducibilidad de los procesos.

A pesar de estos progresos, aún existe una brecha importante en la adopción de herramientas automatizadas dentro del ámbito del vermicompostaje. La mayoría de las iniciativas actuales se encuentran en fases experimentales o de pequeña escala, sin consolidarse en aplicaciones prácticas de mayor alcance ni en sistemas capaces de operar de manera continua. Esto limita la capacidad de escalar la producción y de garantizar una calidad homogénea del humus, restringiendo el aprovechamiento de su potencial como fertilizante orgánico y bioestimulante.

El humus derivado del vermicompostaje es un subproducto de alto valor agronómico, reconocido por mejorar la fertilidad del suelo, incrementar la capacidad de retención de agua y promover el crecimiento y la productividad de los cultivos. Su correcta obtención requiere mantener condiciones adecuadas de humedad, temperatura, densidad poblacional de lombrices y disponibilidad de alimento, parámetros que resultan difíciles de controlar de manera manual en sistemas a gran escala. Por esta razón, la automatización integral de los procesos de vermicompostaje se presenta como una estrategia clave para asegurar la calidad y consistencia del producto final.

Actualmente, los sistemas automatizados desarrollados se han limitado principalmente a prototipos o validaciones preliminares, sin alcanzar una implementación robusta ni estandarizada, como se ilustra en la fig. 4. Esta situación evidencia la necesidad de fortalecer la investigación aplicada en este campo, enfocándose en la integración de tecnologías de monitoreo en tiempo real, control automatizado y análisis de datos, que permitan no solo mejorar la eficiencia operativa, sino también garantizar la producción continua de humus de alta calidad a escala comercial.

Además, la automatización del vermicompostaje no solo optimiza la producción de humus, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental al facilitar la gestión de residuos orgánicos, reducir pérdidas de materia orgánica y minimizar la intervención manual. La combinación de sensores inteligentes, algoritmos de control y plataformas de monitoreo representa un paso hacia la digitalización completa de estos sistemas, posicionando al vermicompostaje automatizado como una tecnología estratégica para la agricultura sostenible y la economía circular.

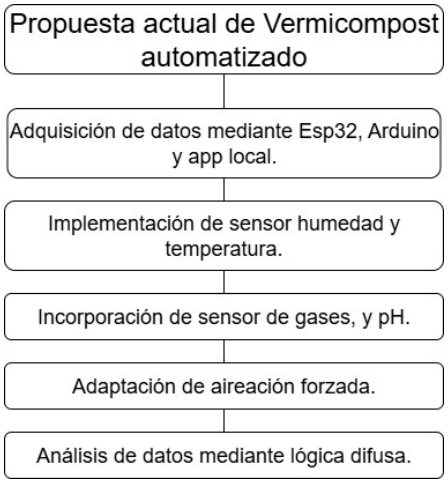


Fig. 4. Vermicompostadores en temas de investigación.

5. MÉTODOS DE SEPARACIÓN LOMBRIZ-HUMUS

Aunque la separación del humus y las lombrices no es un tema reciente, se ha investigado de manera continua desde la década de 1990 hasta el año 2021 ((Lin et al., 2021a),(Price and Phillips, 1990),(Embalzado et al., 2019),(Urade et al., 2016),(Manyuchi et al., 2013),(Lin et al., 2021b)). los avances alcanzados a lo largo del tiempo han sido significativos. En las primeras etapas, los métodos utilizados se caracterizaban por ser rudimentarios, con una elevada dependencia de la intervención manual. Esto limitaba la eficiencia del proceso, aumentaba la variabilidad en los resultados y reducía la reproducibilidad de los ensayos, lo que dificultaba su aplicación en escalas mayores.

Con el transcurso de los años, la incorporación de desarrollos tecnológicos permitió transformar este escenario. Las mejoras introducidas favorecieron una mayor rapidez y precisión en la separación, redujeron las pérdidas de organismos y elevaron la calidad del humus obtenido. Este progreso consolidó la separación como una etapa crítica dentro del ciclo de vermicompostaje, al mismo tiempo que abrió la puerta a su integración en modelos productivos más sistematizados

Actualmente, uno de los sistemas más representativos es el cilindro rotatorio conocido como Trommel, mostrado en la fig. 5. Este equipo constituye una evolución técnica relevante, ya que puede alcanzar eficiencias de hasta un 95 % en la separación humus–lombriz, siempre que se mantengan condiciones adecuadas de operación, como una humedad cercana al 40 % y una velocidad de rotación de 50 rpm. Tales características permiten obtener una separación más limpia y precisa, con menor demanda de tiempo y mano de obra, lo que facilita la transición hacia aplicaciones comerciales e industriales. Sin embargo, aún persisten desafíos vinculados con la automatización integral, la adaptación del sistema a distintos volúmenes

de procesamiento y la necesidad de establecer parámetros estandarizados que garanticen un desempeño constante en diferentes contextos productivos.

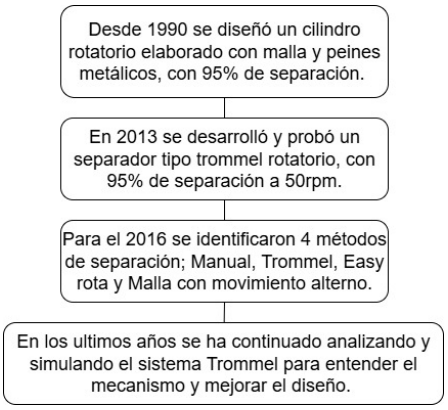


Fig. 5. Separadores de humus-lombriz en temas de investigación.

6. OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS PARA EL HUMUS DE LOMBRIZ COMO FERTILIZANTE SOSTENIBLE

Áreas de oportunidad para el fortalecimiento tecnológico y sostenible en el vermicompostaje

De acuerdo con los avances revisados, aún existen múltiples áreas de oportunidad que pueden impulsar la eficiencia del vermicompostaje y su contribución directa a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular al ODS 15, meta 15.3, orientada a la restauración de suelos degradados y la vida de ecosistemas terrestres, como se muestra en la fig. 6 . Estas oportunidades abarcan desde la automatización hasta la sostenibilidad energética y la integración de tecnologías emergentes:

Sistema automatizado de alimentación

- Desarrollar un sistema inteligente de suministro de residuos orgánicos, calibrado según la relación carbono-nitrógeno y el consumo real de las lombrices.
- Esto permitiría evitar la sobrealimentación, mejorar la eficiencia de degradación y reducir pérdidas por lixiviados o fermentación no deseada.

Sensores de monitoreo de proceso

- Incorporar sensores que estimen el tiempo restante para la cosecha y el estado de maduración del humus, brindando retroalimentación en tiempo real al usuario.
- Añadir sensores de conductividad eléctrica, CO2, humedad, oxígeno y nutrientes del sustrato, para lograr un control más integral del sistema y prevenir condiciones desfavorables para las lombrices.

Protección biológica y ambiental

- Instalar sensores o mecanismos de alerta frente a la presencia de depredadores (hormigas, ácaros, roedores, entre otros).
- Integrar sistemas de control de temperatura y humedad extrema para proteger a las poblaciones en escenarios de cambio climático o variabilidad ambiental.

Integración de inteligencia artificial y control predictivo

- Evolucionar hacia algoritmos de IA y redes neuronales capaces de predecir comportamientos del sistema (crecimiento poblacional, consumo, generación de humus).
- Aplicar modelos de control predictivo para ajustar variables críticas en tiempo real, evitando desviaciones que comprometan la producción o la salud de las lombrices.

Gestión avanzada de residuos

- Clasificación e integración de diferentes tipos de residuos (domésticos, agrícolas, agroindustriales), con parámetros adaptativos que ajusten las condiciones del vermicompost según el insumo.
- Realizar un precompostaje para acelerar la biodisponibilidad de nutrientes y reducir riesgos de patógenos.

Escalabilidad y validación en campo

- Escalar los prototipos a entornos reales de producción, evaluando desempeño bajo condiciones climáticas, volúmenes y calidades de residuo variables.
- Analizar la viabilidad económica y operativa en granjas, invernaderos, industrias agroalimentarias y entornos urbanos.

Automatización de cosecha y separación

- Diseñar sistemas que permitan la separación automática de lombrices y humus, reduciendo tiempos, costos de mano de obra y estrés en las poblaciones.
- Incorporar mecanismos para la cosecha inteligente en función de los niveles de humus y densidad de lombrices, evitando la sobrepoblación o condiciones que limiten la supervivencia.

Sostenibilidad energética

- Integrar energías renovables como paneles solares o sistemas híbridos que permitan la operación continua de sensores, actuadores y sistemas de control sin incrementar la huella de carbono.

Monitoreo de lixiviados

- Incorporar sensores de nivel y calidad de lixiviados, ya que un manejo inadecuado puede afectar el balance hídrico y la oxigenación del sustrato.
- Aprovechar los lixiviados como fertilizante líquido, generando un subproducto de valor agregado con control de calidad en tiempo real.

Optimización de la densidad poblacional

- Establecer sistemas de monitoreo y alerta que controlen el equilibrio poblacional de lombrices.
- Reconocer que más lombrices no necesariamente implican mayor eficiencia: si las condiciones del sustrato no son suficientes, se generan pérdidas en peso, menor producción de humus y estrés poblacional.

En conjunto, estas áreas de oportunidad no solo promueven la eficiencia técnica y biológica del vermicom-

postaje, sino que también lo fortalecen como una solución sostenible y escalable para el manejo de residuos y la regeneración de suelos, contribuyendo a la meta 15.3 del ODS 15 y a la construcción de modelos de producción agrícola más circulares y resilientes.

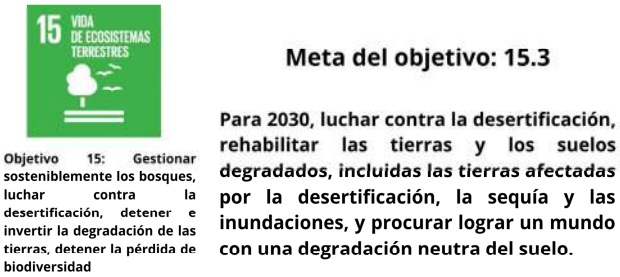


Fig. 6. Contribución.

7. CONCLUSIÓN

El vermicompostaje representa una estrategia biológica y tecnológica de gran relevancia para la gestión sostenible de residuos orgánicos y la regeneración de suelos, al transformar desechos en humus de alta calidad que favorece la fertilidad y el equilibrio de los ecosistemas terrestres. La comprensión de la biología de las lombrices, junto con el control de factores como densidad poblacional, peso y eficiencia de degradación, resulta fundamental para garantizar un sistema equilibrado y productivo. No obstante, los retos actuales evidencian la necesidad de integrar herramientas de monitoreo, control y automatización que permitan optimizar los procesos y superar las limitaciones de los métodos tradicionales.

Los avances tecnológicos en sensores, inteligencia artificial, automatización de alimentación y separación, así como la integración de energías renovables, abren nuevas posibilidades para convertir al vermicompostaje en un sistema inteligente y escalable, capaz de adaptarse a condiciones diversas y aportar soluciones tanto a nivel doméstico como agroindustrial. Asimismo, el precompostaje, la protección frente a depredadores, la gestión de lixiviados y el control de densidad poblacional se consolidan como áreas clave para incrementar la resiliencia y sostenibilidad del sistema.

En este marco, el vermicompostaje trasciende su papel como técnica de aprovechamiento de residuos y se posiciona como una herramienta estratégica alineada con la Agenda 2030, particularmente con el ODS 15, meta 15.3, al contribuir directamente en la restauración de suelos degradados, la protección de ecosistemas y la construcción de modelos agrícolas más circulares, eficientes y sostenibles. El camino hacia la innovación en esta área radica en la integración de biología, tecnología y sostenibilidad energética, consolidando al vermicompostaje como un modelo de referencia para la transición hacia sistemas productivos respetuosos con el ambiente y resilientes ante los desafíos globales.

REFERENCES

Aquino, A.U., Baylon, D.G., Dela Cruz, F.P.B., Medina, M.A.H.J.M., Reyes, G.A., Tulauan, J.M.L., Amado, T.M., Ramos, J.P.M., Tolentino, L.K.S., and Fernandez, E.O. (2019). Development of a solar-powered closed-loop vermicomposting system with automatic monitoring and correction via iot and raspberry pi module. In *2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*, 1–5. doi: 10.1109/HNICEM48295.2019.9073372.

Bagali, V., Jiddi, V., and Jahagirdar, W. (2021). Vermicomposting of biodegrable waste: An iot based approach. In *2021 5th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECCOT)*, 443–447. doi:10.1109/ICEECCOT52851.2021.9708002.

Barcelon, M.S., Orilla, A.A., Mahilum, J.A., and Adtoon, J.J. (2019). Automated vermiculture monitoring and compost segregating system using microcontrollers. In *Proceedings of the 6th International Conference on Bioinformatics Research and Applications*, 38–42.

Barrón-Bravo, O.G., Pérez, J.P., Avilés-Ruiz, R., Ángel-Sahagún, C.A., Garza-Cedillo, R.D., and Mar-Baltazar, I. (2024). Parámetros de calidad del lixiviado en lombricomposta producida con estiércol de bovino.

Brown, G.G., Barois, I., and Lavelle, P. (2000). Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activityin the drilosphere and the role of interactionswith other edaphic functional domains. *European journal of soil biology*, 36(3-4), 177–198.

Domínguez, J. and Gómez-Brandón, M. (2010). Ciclos de vida de las lombrices de tierra aptas para el vermicompostaje. *Acta zoológica mexicana*, 26(SPE2), 309–320.

Embalzado, E., Samaniego, L., Cortez, Z., Justimbaste, K.G., Naidas, J.M.L., and Polido, M.C. (2019). Automated vermicomposting system (of proper waste ratio+ mcu vermicomposting bed). In *2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*, 1–5. IEEE.

Gavilanes, J.D., Pulla, D.A., Tierra-Llanga, A., Reyes, F., and Isa-Jara, R. (2024a). An iot system for monitoring and controlling microclimates using fuzzy logic applied to a vermicompost culture. In *2024 IEEE Eighth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, 1–6. IEEE.

Gavilanes, J.D., Pulla, D.A., Tierra-Llanga, A., Reyes, F., and Isa-Jara, R. (2024b). An iot system for monitoring and controlling microclimates using fuzzy logic applied to a vermicompost culture. In *2024 IEEE Eighth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, 1–6. doi: 10.1109/ETCM63562.2024.10746061.

González-Márquez, L.C., Félix-Gastélum, R., Sandoval-Romero, J.A., Escobedo-Urías, D.C., and Longoria-Espinoza, R.M. (2021). Caracterización de biofertilizantes utilizados en el valle agrícola de guasave, sinaloa, méxico. *Terra Latinoamericana*, 39.

Lavelle, P. et al. (1996). Diversity of soil fauna and ecosystem function. *Biology international*, 33(3.16).

Lin, J., shuai zhao, and Yuan, Q. (2021a). A novel technology for separating live earthworm from vermi-

compost: Experiment, mechanism analysis, and simulation. *Waste Management*, 131, 50–60. doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.031.

Lin, J., Zhao, S., Yuan, Q., Liao, Q., Liu, M., and Wang, Y. (2021b). Rapidly separating earthworm from vermicompost using two-step technology. *Waste and Biomass Valorization*, 12(2), 757–771.

Manyuchi, M.M., Phiri, A., et al. (2013). Effective separation of vermicasts fromearthworms using a cylindrical rotary trommel separator. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(8).

Monroy, A.I.G. and Esquivel, I.A.G. (2021). Sistema de automatización para una lombricomposta. *Revista Electrónica sobre Tecnología, Educación y Sociedad*, 8(15).

Price, J. and Phillips, V. (1990). An improved mechanical separator for removing live worms from worm-worked organic wastes. *Biological wastes*, 33(1), 25–37.

Raghunath, S., Banu, S.N., Talluri, P., Reddy, V.N., and Chouhan, L. (2025). Sensor integrated smart composting bin for household applications. In *2025 International Conference on Emerging Trends in Industry 4.0 Technologies (ICETI4T)*, 1–5. doi: 10.1109/ICETI4T63625.2025.11132135.

Reddy, D.R., Kalyani, N.L., Billakanti, R., Bale, H., and Daddanala, S. (2024). Iot-based earthworm cultivation system for enhanced soil fertility and sustainable agriculture. In *2024 2nd International Conference on Recent Trends in Microelectronics, Automation, Computing and Communications Systems (ICMACC)*, 709–715. doi:10.1109/ICMACC62921.2024.10894138.

Ríos, Y. (2005). Importancia de las lombrices en la agricultura. *Universidad Centro occidental "Lisandro Alvarado". Decanato de Agron. Guanare, Portuguesa*, 47–52.

Shalini, V.B., Maheswari, A.U., Marimuthu, C., and Jeshima, J. (2022). Vermi-composting using ai in iot. In *2022 International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC)*, 1489–1493. doi: 10.1109/ICAAIC53929.2022.9793207.

Shipitalo, M.J. and Gibbs, F. (2000). Potential of earthworm burrows to transmit injected animal wastes to tile drains. *Soil Science Society of America Journal*, 64(6), 2103–2109.

Tomlin, A. and Protz, R. (1995). Earthworms and their influence on soil. *Earthworm ecology and biogeography in North America*, 159.

Urade, A., Satone, N., Sutsonkar, N., Zade, H., and Rangari, D. (2016). Effective separation of vermicast from earthworms: A review study. *Res. Recent Trends Eng. Technol*, 3(3), 380–383.

Usha, K., Keshavraj, S., et al. (2024). Iot based automation system for efficient production of vermicompost manure. In *2024 10th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, 1–4. IEEE.

Vijayalakashmi, A., Raj, G.H., Prasad, R.V.G., Abishek, B.E., and Stephen, A. (2022). Development of iot based automation system for efficient production of vermicompost manure. In *AIP Conference Proceedings*, volume 2519, 050031. AIP Publishing LLC.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Comparison of Beat-Based and Fixed-Window Segmentation for Phonocardiogram Classification with CNN

Mario-Enrique García-Luna [*] **Said Polanco-Martagón** [*]
Yahir Hernández-Mier [*] **Marco-Aurelio Nuño-Maganda** [*]

[*] *Universidad Politécnica de Victoria (UPV), Av. Nuevas Tecnologías 5902, Parque Científico y Tecnológico de Tamaulipas, 87138 Cd. Victoria, Tamps., México. (e-mails: 2439004@upv.edu.mx; spolancom@upv.edu.mx; yhernandezm@upv.edu.mx; mnunom@upv.edu.mx)*

Abstract: The automatic classification of phonocardiograms (PCG) critically depends on signal segmentation before deep-learning modeling. In this work, we present a controlled comparison between two PCG segmentation strategies for their classification using a CNN (ResNet-152V2) and using a single representation of the data (log-Mel spectrograms). We performed this comparison on the publicly available PhysioNet/CinC 2016 PCG dataset. The two segmentation strategies we compared were: (i) fixed 1-second windows, and (ii) cycle-based segmentation followed by a concatenative temporal mixup (BeatMix-1 second) built on a state-of-the-art U-Net–based segmenter with a transform module. Results of a post-segmentation duration analysis showed that 70% of beats fall within 0.5–1.0 s; therefore, we set 1 s as the canonical unit and aligned transform parameters to that scale. Both approaches were evaluated over 10 independent runs with a held-out test set, reporting mean standard deviation for F1-score, accuracy, sensitivity, and specificity at the recording level. Results indicate that simple 1-s segmentation achieves slightly better performance and lower variance than the cycle-based BeatMix-1s, despite identical preprocessing and classifier (F1: 0.717±0.005 vs. 0.693±0.011; accuracy: 0.719±0.003 vs. 0.697±0.007). These findings position 1-s fixed windows as a solid, reproducible baseline and highlight the need for aggregation/calibration when using cycle-based schemes.

Keywords: Phonocardiogram, heart sound classification, convolutional neural networks, log-Mel spectrograms, segmentation, transfer learning, fine-tuning.

1. INTRODUCCIÓN

La clasificación automática de fonocardiogramas (PCG) mediante *deep learning* ha seguido dos líneas principales. Por un lado, las CNN 2D sobre representaciones tiempo–frecuencia capturan patrones espectro–temporales complejos y ofrecen invariancias útiles cuando se dispone de datos suficientes. Por otro lado, las CNN 1D operan sobre señal cruda o sobre atributos acústicos (MFCC, energía por bandas, cruces por cero, envolventes), con cómputo más ligero y un buen equilibrio entre complejidad y capacidad de generalización.

La segmentación es un elemento determinante: define cuánto contexto cardiaco observa el modelo, condiciona el balance de clases y modula la propagación de errores. Existen dos enfoques recurrentes: segmentación por *ventana fija* y segmentación por *ciclo cardiaco*. La primera es simple y reproducible, pero puede truncar información; la segunda respeta la fisiología, aunque es más sensible al ruido y produce muestras de duración variable. En reposo, un corazón adulto late típicamente entre 60 y 100 lpm; un latido dura 0.6–1.0 s (Ernstmeyer et al., 2021), lo que sugiere duraciones de referencia para separar información de PCG.

Pregunta de investigación. ¿Es preferible segmentar PCG en ventanas de 1 s o agrupar ciclos cardiacos naturales concatenados hasta completar 1 s? Para responder, comparamos ambas estrategias alimentando una CNN con espectrogramas log–Mel de señales PCG segmentadas en ventanas fijas de 1 s, y ciclos cardiacos concatenados hasta 1 s.

1.1 Segmentación por ventana fija

En la segmentación por ventana fija se define una duración estándar para todas las muestras; así se prescinde de un segmentador de latidos, lo que simplifica su implementación. Una única ventana puede cubrir varias fases del ciclo, mezclando información. Para estandarizar duraciones irregulares se usan dos recursos: *zero–padding* cuando falta señal y *truncation* cuando sobra. En la literatura se emplean tamaños típicos entre 2.5 y 5 s, garantizando al menos un latido completo por muestra. Por ejemplo, en

[1] Autor de correspondencia: Mario Enrique García Luna (2439004@upv.edu.mx).

(Chen et al., 2023) los autores segmentan en ventanas de 2.5 s, transforman a Mel y log–Mel, y entrenan una CNN con 2 kHz, DFT de 512 puntos, 128 filtros Mel y ventana de Hanning. Usando el dataset PhysioNet/CinC 2016 reportan *accuracy* de 87.42 % representando los datos mediante espectrogramas de Mel y 91.74 % usando espectogramas de log–Mel, lo que sugiere que la representacion es escala logarítmica proporciona mejores resultados. En (Wang et al., 2023) los autores usan 5 s para comparar STFT, log–Mel, HHT, Wavelet, MFCC y Stockwell con *transfer learning* (VGG16/VGG19) en un formato de imagen canónico (224×224×3); informan *mean accuracy* (MAcc) de 65.2 % para Stockwell. Más allá de representaciones 2D, en (Hussain et al., 2023) los autores exploran una CNN 1D ligera sobre 8 s con 2 kHz, filtro Butterworth (20–500 Hz) y técnicas de balanceo, reportando *accuracy* 95.45 %, *F1* 95.45 %, *Sensitivity* 97.44 %, *Specificity* 93.6 %. La elección de duración suele ajustarse al método de representación y al clasificador.

1.2 Segmentación por ciclo cardiaco

A diferencia de la ventana fija, la segmentación por ciclo cardiaco localiza las fases S1–sístole–S2–diástole (Figura. 1). El resultado es no uniforme: los ciclos varían en duración. Para obtener muestras comparables se agrupan varios latidos hasta la duración objetivo, preservando coherencia fisiológica.

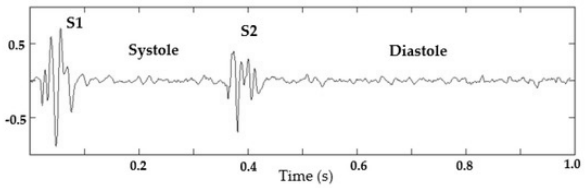


Figura 1. Fases S1–sístole–S2–diástole del ciclo cardiaco.

A continaución se presentan 5 diferentes estrategias de segmentación por ciclo cardiaco encontradas en la literatura.

Enfoque probabilístico LR–HSMM (método de Springer) (Springer et al., 2016) modelan S1–sístole–S2–diástole con un *Hidden Semi–Markov Model* (cuatro estados con duraciones explícitas). Cada *frame* se puntúa con regresión logística sobre rasgos temporales/espectrales y se decodifica con Viterbi, garantizando continuidad y plausibilidad fisiológica. Ofrece interpretabilidad, control fino de duraciones y rendimiento competitivo con datos anotados limitados, por lo que sigue siendo un referente práctico en PhysioNet/CinC 2016.

LSTM unidireccionales Las *Long Short-Term Memory* (LSTM) (Hochreiter and Schmidhuber, 1997) modelan dependencias de corto y largo alcance y son viables para etiquetado temporal (S1, sístole, S2, diástole) aprendiendo representaciones de la señal y reduciendo *feature engineering*. En configuración unidireccional sólo explotan contexto pasado, lo que puede dificultar la delimitación precisa de S1/S2.

Bi–LSTM bidireccionales Las *Bidirectional LSTM* modelan la secuencia en ambas direcciones temporales, atenuando el impacto del ruido al ponderar dinámicamente *frames* relevantes. A cambio, implican mayor complejidad y suelen requerir más datos y regularización que su contraparte unidireccional.

Bi–LSTM con atención (Fernando et al., 2020) proponen una Bi–LSTM con mecanismo de atención para localizar S1/S2/None (en lugar de cuatro fases), comparando atributos (Homomorphic, Hilbert, Wavelet envelope, PSD, MFCC). Reportan *accuracy* del 97 % en PhysioNet/CinC 2016 y sugieren extender a clasificación con CNN o RNN.

Segmentación densa tipo imagen (U–Net) U–Net (Ronneberger et al., 2015) realiza predicción densa mediante una arquitectura *encoder–decoder* simétrica con *skip connections* por concatenación y *upsampling*. En PCG, se emplea en 1D (etiquetado por *frame* de S1/sístole/S2/diástole) y en 2D (segmentación en espectrogramas). El desempeño mejora con anotaciones temporales precisas y puede reforzarse con posprocesado fisiológicamente coherente (suavizado y consistencia de estados).

En síntesis, la segmentación por ciclo cardiaco brinda localizaciones de latidos que habilitan metodologías que explotan información fisiológica más fina que la ventana fija y, potencialmente, mejoran la clasificación.

1.3 Implementacion de segmentadores por ciclo cardiaco en CNNs

A continuación se presentan ejemplos de uso de segmentadores por ciclo cardiaco para clasificación de PCG.

En el método *U–Net + CNN (He et al., 2021)*, los autores segmentan el PhysioNet/CinC 2016 en ventanas de 512 muestras a 50 Hz (10.24 s) y se comparan *AdaBoost* y una CNN con cuatro envolventes (Hilbert, homomorphic, wavelet, PSD). La CNN supera a *AdaBoost* (por ejemplo, *Sensitivity* 0.964, *Specificity* 0.781, *Accuracy* 0.873), reafirmando la ventaja de CNN frente a métodos tradicionales.

En el método *LR–HSMM (Springer) + ResNet (Azam et al., 2022)*, los autores detectan el inicio de ciclo con LR–HSMM y fijan una ventana de 2.5 s con *zero–padding* si es necesario. Se extraen FBank/Log–FBank/MFCC y se entrena ResNet (evaluación *patient–wise* y balance por dominio). La mejor fusión (FBank+MFCC–13) alcanza AUC 91.36 %, F1 84.09 % y MAcc 85.08 %.

En el metodo *LR–HSMM (Springer) + CNN 1D (Saeedi et al., 2021)*, los autores usan ventanas con una duración de entre 5 y 8 s, con una frecuencia de muestreo de 1 kHz y filtrado Butterworth (50–800 Hz). Los autores aplican LR–HSMM para etiquetar estados cardiacos y se extraen 61 atributos de tiempo, frecuencia y tiempo–frecuencia para k–NN ponderado y SVM lineal; reportan *accuracy* de hasta 98.15 %.

1.4 Segmentación mejorada por CNN y FFT

En (Park et al., 2025) 2025 los autores proponen el segmentador **PCG_FTseg**, que es una red U-Net con modulos de *Convolutional Fourier Transform*, CFT. Los autores reportan mejoras en F1-score por eventos S1/S2 gracias a la combinación de convolución temporal con bloques FFT/iFFT que refuerzan transiciones S1/S2 y separan

señal de ruido sin perder la estabilidad de U–Net. El código es público (brody9512, 2025) (remuestreo objetivo a 1 kHz y filtrado pasabajas), con licencia MIT y guías de entrenamiento/evaluación. La Tabla 1 resume resultados representativos.

Tabla 1. PhysioNet/CinC 2016 (resumen): comparación de segmentadores por evento (%).

Método	Sensitivity	Precision	F1
LR–HSMM	95.60	94.40	95.00
LSTM	93.50	92.47	92.95
BiLSTM	94.87	94.53	94.93
U–Net	91.72±0.10	92.06±0.14	91.77±0.02
U–Net + CFT	97.67±0.03	97.64±0.15	97.64±0.09

Notas: métricas por evento S1/S2; media ± desviación estándar, según (Park et al., 2025).

En este trabajo comparamos dos estrategias de segmentación: (i) ventanas fijas de 1 s y (ii) ciclos cardiacos concatenados hasta 1 s, manteniendo constante la representación de los datos mediante espectrogramas de log–Mel, asi como el clasificador (ResNet–152V2) y los criterios de entrenamiento/evaluación.

2. METODOLOGÍA

2.1 Conjunto de datos: PhysioNet/CinC 2016

En este trabajo usamos el conjunto PhysioNet/Computing in Cardiology Challenge 2016 (Liu et al., 2016) para clasificación binaria *Normal* vs. *Abnormal*. Integra señales heterogéneas (entornos, equipos y ruido: respiración, roce, artefactos), lo que lo convierte en un banco exigente para validar la robustez en condiciones realistas. Como muestra la Tabla 2 el dataset en total está compuesto por 764 sujetos y 3 240 grabaciones (2 kHz), con duraciones entre 5 y 120 s y un desbalance aproximado de 80 % normal / 20 % abnormal.

Tabla 2. Distribución del conjunto PhysioNet/CinC 2016 por sub-conjunto.

Dataset	**Subjects**	**Normal**	**Abnormal**	**Total**
Training-a	121	117	292	409
Training-b	106	386	104	490
Training-c	31	7	24	31
Training-d	38	27	28	55
Training-e	356	1958	183	2141
Training-f	112	80	34	114
Total	**764**	**2575**	**665**	**3240**

2.2 Segmentación por ciclo cardiaco con PCG_FTSeg

Para efectuar la segmentación por ciclo cardiaco, replicamos PCG_FTSeg (Park et al., 2025) (U–Net con módulos *Convolutional Fourier Transform*, CFT) sobre todo el conjunto. Preprocesamos con remuestreo a 1 kHz y pasabajas a 250 Hz, generando 92 868 segmentos entre 0.25 y 5 s; el 70 % cae en 0.5–1 s, acorde a 60–100 lpm. Fijamos una duración objetivo de 1 s para la fase de representación, coherente con ambos esquemas de segmentación. Validamos la réplica con el *script* oficial y obtuvimos un F1 global 0.93 (frente a 0.97 reportado por (Park et al., 2025)). Aun así, la segmentación fue suficientemente fiable; para homogenizar, restringimos los segmentos a ≤ 1.5 *s* (99 % del total), reduciendo casos extremos. Esta etapa permite aumentar el número de muestras sin recurrir a interpolaciones o aumentos no fisiológicos.

2.3 Propuesta BeatMix-1s (MixUp por latidos)

Para construir ventanas exactas de 1 s preservando coherencia fisiológica, proponemosBeatMix-1s, una variante inspirada en *mixup* aplicada *sobre la señal de audio* y no sobre imágenes. A diferencia de *mixup* clásico (combinación convexa y etiquetas blandas), BeatMix-1s concatena 1–5 latidos segmentados por PCG_FTSeg hasta completar 1 s con cosido suave y etiquetado duro (si algún latido es *abnormal*, la ventana resultante es *abnormal*).

Reglas algorítmicas para el proceso BeatMix-1s:

- Stitching con solape de 50 ms y *cross-fade* lineal (mezcla α en el solape) para evitar saltos energéticos.
- Si la concatenación excede 1 s, se recorta el último fragmento para cerrar exactamente a 1 s.
- Se descartan fragmentos residuales < 100 ms por baja aportación informativa.
- Coherencia fisiológica: se eliminan ensamblajes con transiciones inverosímiles (orden de estados implausible).
- Muestreo estocástico en la selección y orden de latidos.

Sobre las 92 868 muestras iniciales (80/20), BeatMix-1s genera 63 957 ventanas nuevas de 1 s; tras el filtro de coherencia, se descarta 19.5 % y se obtiene un conjunto depurado de 51 520 muestras (60 % normal / 40 % abnormal). El objetivo es estandarizar duración y mejorar balance evitando *zero-padding* o distorsiones espectrales.

2.4 Segmentación por ventana fija de 1 s

Como contrapeso directo, aplicamos ventanas no traslapadas de 1 s sobre señales remuestreadas a 1 kHz y filtradas a 250 Hz (idéntico formato de salida que PCG_FTSeg). La etiqueta *Normal/Abnormal* de la grabación se propaga a todas sus ventanas. Este esquema conserva el desbalance original (80/20) y produce 71 344 ventanas de 1 s. La uniformidad de duración simplifica la frontera de decisión y reduce ruido de etiqueta; el no traslape evita dependencias fuertes entre ejemplos adyacentes.

2.5 Extracción de características: espectrograma log–Mel

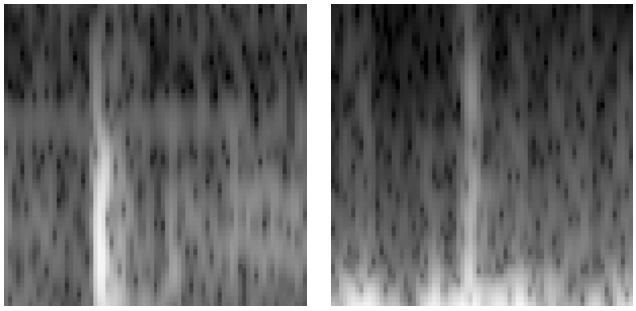
Las ventanas de 1 s se transforman en espectrogramas log–Mel con parámetros adaptados a esta duración (evitando escalas "canónicas" de 2.5–5 s que distorsionan la resolución temporal):

Cada ventana produce una matriz $[64 \times 100101]$ que se reescala a $[224 \times 224 \times 3]$ (RGB) para compatibilidad con *backbones* preentrenados. La escala logarítmica comprime picos y preserva detalle en bajas energías, mejorando la discriminabilidad en PCG.

En las Figuras 2 y 3 podemos ver un ejemplo de los PNG que resultantes generados usando la misma configuración log-Mel

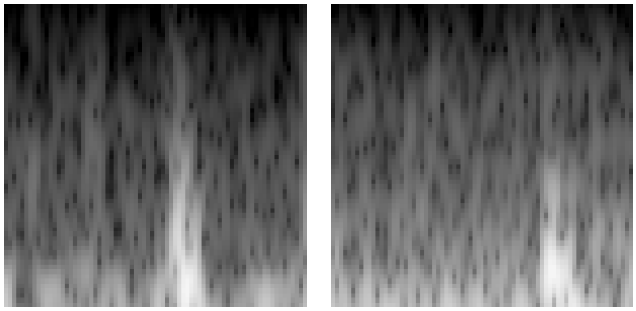
Tabla 3. Parámetros log–Mel (ventana de 1 s).

Parámetro	Descripción	Valor
SR	Frecuencia de muestreo	1 kHz
win	Tamaño de ventana STFT	50 ms
hop	Salto STFT	10 ms
n_{fft}	Puntos de la FFT	256
n_{mels}	Filtros en banco Mel	64
$f_{\text{mín}}$	Frecuencia mínima	25 Hz
$f_{\text{máx}}$	Frecuencia máxima	300 Hz
`top_db`	Rango dinámico (log–Mel)	80



Normal (BeatMix-1s) Anormal (BeatMix-1s)

Figura 2. Ejemplos de log–Mel para la metodología BeatMix-1s: casos Normal y Anormal. Misma configuración de transformada que en la Fig. 3.



Normal (ventana 1 s) Anormal (ventana 1 s)

Figura 3. Ejemplos de log–Mel para la metodología de ventana fija de 1 s: casos Normal y Anormal.

2.6 Clasificador y entrenamiento

Como clasificador, usamos ResNet–152V2 (He et al., 2016) (preactivación residual; implementación Keras) con entrada $[224 \times 224 \times 3]$. Añadimos un *head* compacto (MaxPooling, Flatten, Dense con ReLU, Dropout y salida sigmoidal). Entrenamos en dos etapas:

1. *Transfer learning*: congelamos el *backbone* y optimizamos solo el *head* con Adam (10^{-3}), lotes de 256.
2. *Fine-tuning*: liberamos las últimas 80 capas del *backbone* y ajustamos con Adam (10^{-5}); las capas de *Batch Normalization* se mantienen en modo inferencia para evitar *internal covariate shift* con lotes pequeños.

En la Figura 4 se expone la estructura de la red usada para las ejecuciones.

Para la validación, reservamos 10 % del total como *test* fijo. Sobre el 90 % restante, empleamos train/validation 80/20. No aplicamos *data augmentation*, ponderación de clases ni pérdidas especializadas, para que la comparación se centre exclusivamente en la estrategia de segmentación.

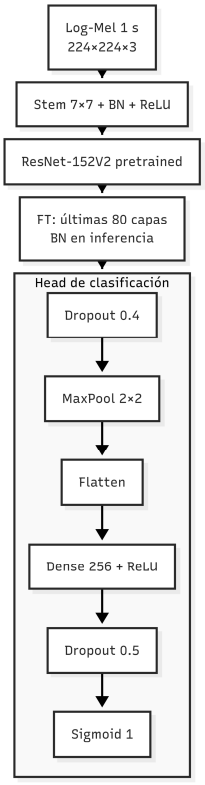


Figura 4. Estructura ResNet con fine tuning y transfer learning

2.7 Evaluación y análisis estadístico

Para la evaluación usamos las métricas *accuracy*, *precision*, *recall*, *F1-score*, *sensitivity* y *specificity* (media ± desviación estándar) sobre 10 corridas independientes por metodología. El umbral de decisión es 0.5. Este diseño captura nivel y estabilidad del desempeño sin depender de un resultado puntual y establece una línea base reproducible sobre la que incorporar, en trabajos futuros, aumentos de datos, reponderación por clase, agregación a nivel de registro o funciones de pérdida alternativas.

Estos estudios demuestran el amplio panorama de metodologías que se emplean para la clasificación de PCG, cada autor decide que segmentador usar en su preprocesamiento, así como que CNN y con qué información alimentarla.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 4 resume los resultados, donde podemos observar que la segmentación por ventana fija de 1 s alcanza mejor *accuracy* y menor varianza que BeatMix-1s a lo largo de las 10 corridas. Las Figuras 5 y 6 muestran las matrices de confusión correspondientes a la mejor ejecución de cada enfoque y son consistentes con las métricas agregadas. La Tabla 5 compara los resultados obtenidos contra el estado del arte.

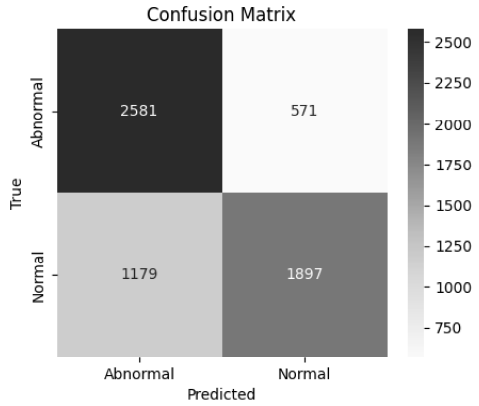


Figura 5. Matriz de confusión de ventana fija

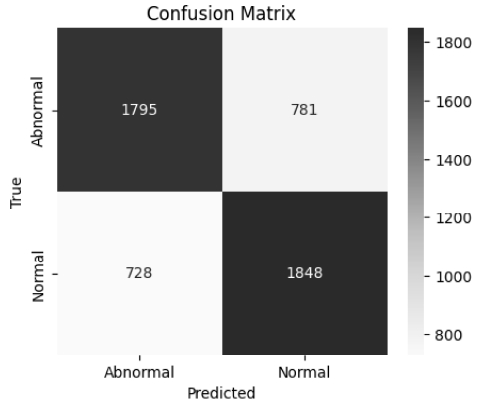


Figura 6. Matriz de confusión de BeatMix-1s

BeatMix-1s ofrece un camino simple y reproducible para capitalizar una segmentación fina sin requerir flujos de anotación complejos. Al concatenar latidos reales hasta 1 s con cosido suave, genera ventanas fisiológicamente plausibles y controla artefactos en las transiciones. No obstante, con el diseño experimental actual, su desempeño se ve limitado por el tamaño efectivo del conjunto y la distribución de clases resultante.

En la literatura de clasificación de PCG basada en representaciones tiempo–frecuencia y *transfer learning*, las ventanas largas (2.5–5 s) y los esquemas de entrenamiento enriquecidos (aumento de datos, reponderación de clases, agregación a nivel de registro, ensambles) suelen reportar métricas superiores. Nuestros resultados se ubican por debajo de esos valores por un motivo deliberado: priorizamos un pipeline controlado y minimalista para aislar el efecto de la segmentación, sin *data augmentation*, sin balanceo artificial y con un único clasificador fijo.

Un factor clave es la asimetría en tamaño y balance entre conjuntos. La segmentación fija produce 71 344 ventanas (80/20 *Normal/Abnormal*), mientras que BeatMix-1s genera 51 520 (60/40). Es decir, la estrategia fija dispone de un 38.47 % más de ejemplos totales, pero con un desbalance mayor; BeatMix-1s, en cambio, opera con menos muestras pero un balance más favorable. Este contraste sugiere que, con menos datos pero mejor balance, BeatMix-1s puede acercarse al rendimiento de la ventana fija; por extrapolación, aumentar el número de muestras y mantener un balance adecuado debería estrechar la brecha respecto a la literatura.

En síntesis, la ventana fija de 1 s ofrece la mejor combinación de *accuracy* y estabilidad en nuestro marco experimental, probablemente por el mayor número de ejemplos y la homogeneidad temporal que facilita el aprendizaje del clasificador. BeatMix-1s destaca por su reproducibilidad y por mejorar el balance de clases sin artificios, constituyendo una base prometedora para extensiones con *data augmentation*, class weighting, calibración de umbral y agregación a nivel de registro.

Tabla 4. Resumen (media ± desviación estándar) de 10 ejecuciones por método.

Métrica	**Ventana fija (1 s)**	**BeatMix-1s**
Accuracy	0.719 ± 0.003	0.697 ± 0.007
Precision	0.725 ± 0.007	0.707 ± 0.005
Recall	0.719 ± 0.003	0.697 ± 0.007
F1	0.717 ± 0.005	0.693 ± 0.011
Sensitivity	0.796 ± 0.043	0.790 ± 0.043
Specificity	0.641 ± 0.040	0.607 ± 0.057

4. CONCLUSIONES

En este trabajo comparamos dos estrategias de segmentación manteniendo fijo el preprocesamiento (log–Mel a 1 s) y el clasificador (ResNet–152V2 con *head* denso regularizado). Estimamos el desempeño como media y desviación estándar sobre 10 corridas independientes con agregación a nivel de grabación. En estas condiciones, la ventana fija de 1 s mostró consistentemente mayor *accuracy* y *F1-score* y, a la vez, menor varianza que la variante por ciclo con concatenación temporal BeatMix–1s. La ventaja no es abrupta, pero es estable a través de las métricas y sugiere que, para clasificación por grabación, ofrecer muestras homogéneas con etiquetas limpias favorece decisiones más robustas del clasificador.

La distancia respecto a los mejores reportes de la literatura se explica por dos factores principales: (i) el menor contexto temporal efectivo usado aquí (1 s frente a ventanas de 2.5–8 s o agregaciones más largas) y (ii) la ausencia deliberada de técnicas que suelen elevar las métricas (*data augmentation*, *class weighting*, pérdidas especializadas o arquitecturas con memoria explícita como RNN/LSTM). Aun bajo este protocolo minimalista y controlado —diseñado para aislar el efecto de la segmentación—, obtenemos métricas estables y competitivas como *baseline*, lo que respalda el uso de log–Mel y una CNN profunda como punto de partida fiable.

El trabajo futuro se orienta a (i) incorporar aumentos de datos específicos para audio (*time/frequency masking*, *time shift*, ruido aditivo realista), (ii) abordar el desbalance con *class weights* u *over/under-sampling* y explorar funciones de pérdida acordes al objetivo clínico (focal, AUC–maximizing) para elevar sensitivity sin deteriorar precision, (iii) estudiar la activación de *Batch Normalization* en modo entrenable durante el *fine-tuning* y (iv) evaluar agregación a nivel de grabación (votación por mayoría o *multiple instance learning*) y calibración de umbral/probabilidad.

Tabla 5. Comparación con trabajos representativos en PhysioNet/CinC 2016 y nuestros resultados.

Estudio	Segmentación	Clasificador	Características	Resultados
(Chen et al., 2023)	Ventana fija 2.5 s	CNN propia	Mel & Log-Mel	Acc: 87.42 % (Mel), 91.74 % (Log-Mel)
(Wang et al., 2023)	Ventana fija 5 s	VGG16/VGG19 (TL)	STFT, Log-Mel, HHT, Wavelet, MFCC, Stockwell	MAcc: 65.2 % (Stockwell, mejor)
(Hussain et al., 2023)	Ventana fija 8 s	CNN 1D propia	Señal cruda (2 kHz, BW 20–500 Hz)	Acc: 95.45 %; F1: 95.45 %; Se: 97.44 %; Sp: 93.60 %
(He et al., 2021)	Por ciclo (U–Net) ventanas 10.24 s	CNN vs AdaBoost	Envolventes (Hilbert, homomórfica, wavelet, PSD)	Se: 0.964; Sp: 0.781; Acc: 0.873
(Azam et al., 2022)	Springer (LR–HSMM) 2.5 s	ResNet–18	Fbank/Log–Fbank/MFCC (fusión)	AUC: 91.36 %; F1: 84.09 %; MAcc: 85.08 %
(Saeedi et al., 2021)	Springer (LR–HSMM) 5 s	kNN/SVM (tras reducción)	61 rasgos t–f / t–fz (PCA+GA)	Acc: hasta 98.15 %
Ventana fija	Ventana fija 1 s	ResNet–152V2 + head	Log–Mel (224×224, RGB)	Acc: 0.719 ± 0.003; F1: 0.717 ± 0.005
BeatMix–1s	Por ciclo + mixup (1 s)	ResNet–152V2 + head	Log–Mel (224×224, RGB)	Acc: 0.697 ± 0.007; F1: 0.693 ± 0.011

Finalmente, consideramos prioritario el despliegue eficiente: evaluar *backbones* más ligeros (MobileNet/EfficientNet) y técnicas de compresión —*quantization*, *pruning*, *knowledge distillation*— para ejecutar el clasificador en dispositivos embebidos sin sacrificar la accuracy clínica.

REFERENCIAS

Azam, F.B., Ansari, M.I., Nuhash, S.I.S.K., McLane, I., and Hasan, T. (2022). Cardiac anomaly detection considering an additive noise and convolutional distortion model of heart sound recordings. *Artificial Intelligence in Medicine*, 133. doi:10.1016/j.artmed.2022.102417.

brody9512 (2025). Pcg_ftseg. URL `https://github.com/brody9512/PCG_FTSeg`.

Chen, W., Zhou, Z., Bao, J., Wang, C., Chen, H., Xu, C., Xie, G., Shen, H., and Wu, H. (2023). Classifying heart-sound signals based on cnn trained on melspectrum and log-melspectrum features. *Bioengineering*, 10, 645. doi:10.3390/BIOENGINEERING10060645.

Ernstmeyer, K., Christman, E., and for Nursing (Open RN), O.R. (2021). *Chapter 1: General Survey*. Chippewa Valley Technical College. URL `https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK593193/`.

Fernando, T., Ghaemmaghami, H., Denman, S., Sridharan, S., Hussain, N., and Fookes, C. (2020). Heart sound segmentation using bidirectional lstms with attention. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 24, 1601–1609. doi:10.1109/JBHI.2019.2949516.

He, K., Zhang, X., Ren, S., and Sun, J. (2016). Identity mappings in deep residual networks. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9908 LNCS, 630–645. doi:10.1007/978-3-319-46493-0_38.

He, Y., Li, W., Zhang, W., Zhang, S., Pi, X., and Liu, H. (2021). Research on segmentation and classification of heart sound signals based on deep learning. *Applied Sciences 2021, Vol. 11, Page 651*, 11. doi:10.3390/APP11020651.

Hochreiter, S. and Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9, 1735–1780. doi:10.1162/NECO.1997.9.8.1735.

Hussain, S.S., Ashfaq, M., Khan, M.S., and Anwar, S. (2023). Deep learning based phonocardiogram signals analysis for cardiovascular abnormalities detection. *2023 International Conference on Robotics and Automation in Industry, ICRAI 2023*. doi:10.1109/ICRAI57502.2023.10089537.

Liu, C., Springer, D., Li, Q., Moody, B., Juan, R.A., Chorro, F.J., Castells, F., Roig, J.M., Silva, I., Johnson, A.E., Syed, Z., Schmidt, S.E., Papadaniil, C.D., Hadjileontiadis, L., Naseri, H., Moukadem, A., Dieterlen, A., Brandt, C., Tang, H., Samieinasab, M., Samieinasab, M.R., Sameni, R., Mark, R.G., and Clifford, G.D. (2016). An open access database for the evaluation of heart sound algorithms. *Physiological Measurement*, 37, 2181–2213. doi:10.1088/0967-3334/37/12/2181.

Park, C., Shin, K., Seo, J., Lim, H., Kim, G.H., Seo, W.Y., Kim, S.H., and Kim, N. (2025). Enhancement of phonocardiogram segmentation using convolutional neural networks with fourier transform module. *Biomedical Engineering Letters*, 15, 401–413. doi:10.1007/S13534-025-00458-8,.

Ronneberger, O., Fischer, P., and Brox, T. (2015). U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9351, 234–241. doi:10.1007/978-3-319-24574-4_28. U-Net 1.2 cita original.

Saeedi, A., Moridani, M.K., and Azizi, A. (2021). An innovative method for cardiovascular disease detection based on nonlinear geometric features and feature reduction combination. *Intelligent Decision Technologies*, 15, 45–57. doi:10.3233/IDT-200038.

Springer, D.B., Tarassenko, L., and Clifford, G.D. (2016). Logistic regression-hsmm-based heart sound segmentation. *IEEE transactions on bio-medical engineering*, 63, 822–832. doi:10.1109/TBME.2015.2475278.

Wang, Z., Qian, K., Liu, H., Hu, B., Schuller, B.W., and Yamamoto, Y. (2023). Exploring interpretable representations for heart sound abnormality detection. *Biomedical Signal Processing and Control*, 82, 104569. doi:10.1016/J.BSPC.2023.104569.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Characterization of vernacular materials: case of Adobe

C. Bello-Pastor *, M. Castro-Bello*, C. Morales-Morales, C. V. Marmolejo-Vega*, D. Ángeles-Herrera*, E. Jiménez-Romero***

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Av. José Francisco Ruíz Massieu No. 5, Colonia Villa Moderna, C.P. 39090 Chilpancingo, Guerrero, Méx. (e-mail: cbp1704@gmail.com).*

***Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Jan del Río, Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe, San Juan del Río, Querétaro, C.P. 76800, México.*

Abstract: Vernacular materials and their application techniques are a sustainable alternative in construction due to the low CO_2 emissions generated during their use. This research aimed to characterize adobe in the state of Guerrero, Mexico. Its development included a documentary and field study, as well as an analysis of adobe composition using laboratory tests (compressive strength, mesh granulometry, and consistency limits). The results obtained were the geographic distribution of adobe use in the state, representing 16.66% of homes, with Acatepec being the municipality with the highest number of adobe constructions. Laboratory tests showed that this material is composed of low-compressibility silty sand, with a coarse aggregate content of 67.17%, fine aggregate 32.83%, organic matter 0.13%, and a compressive strength of 16.86 kg/cm2. Regarding its characterization, it was identified that the weather conditions under which these tests are carried out influence it, due to its ability to absorb moisture from the environment.

Keywords: Techniques with earth, adobe, vernacular, vernacular material, characterization, resistance.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente el uso de la tierra se ha dado desde la prehistoria con la construcción de los primeros refugios hechos de morteros de tierra para rellenar los espacios existentes entre ramas, evolucionando después a muros con fibra vegetal en el mortero, lo que se conoce actualmente como cob, y con el desarrollo de la humanidad se comenzaron a moldear los morteros hasta lo que hoy se conoce como adobe, siendo utilizado con una técnica similar a la mampostería de piedra (Sánchez-Calvillo *et al.*, 2024).

El desplazamiento que se dio a partir de la revolución industrial por la aparición del acero y concreto (Hu, 2023); su aplicación en las diferentes etapas de construcción son fuentes de contaminación desde el proceso de producción de los materiales hasta su disposición final (Enshassi *et al.*, 2014). Siendo principalmente, el concreto y acero, responsables de emitir más del 14% del total de emisiones de gases de efecto invernadero (UNEP, 2023). Debido a las altas concentraciones de contaminantes que contribuyen al calentamiento global, expertos en la construcción han buscado alternativas de materiales para disminuir la concentración de este tipo de gases.

Los materiales vernáculos como la tierra, madera o bambú son una alternativa en la construcción al generar un impacto ambiental menor en comparación a los industrializados, además de tener ventajas económicas, de disponibilidad y transporte. Sin embargo, es necesario examinar las propiedades de cada uno según el lugar donde se localicen debido a la variabilidad que existe entre especies o tipos (Martínes *et al.*, 2025).

El adobe, mezcla de tierra arcillosa (partes de arena, limos y grava) con materia orgánica y agua, moldeado en bloque y secado al sol, destaca como uno de los principales materiales vernáculos por su uso en la construcción de viviendas (Hu, 2023; Ramakrishnan *et al.*, 2021). En consecuencia, diversos estudios han reportado investigaciones relacionadas a las características, propiedades y composición del adobe.

Caso de Silva et al. (2022) quienes caracterizaron las viviendas vernáculas conocidas como Caramelos en Portugal, mediante la recolección de muestras de adobe de tres construcciones, una en Moita y dos en Pinhal Novo, realizando pruebas físicas, químicas y mecánicas. Observaron que los adobes en Moita están compuestos principalmente por arena y arcilla. Mientras que en Pinhal Novo predomina el limo sin contar con un estabilizador y una conductividad térmica baja. En tanto que Gomes et al. (2022) inspeccionaron los morteros de tierra apisonada y mampostería de la Muralla Defensiva Fernandina de Lisboa, experimentando en nueve puntos de la estructura, aplicando análisis químico, húmedo, difracción de rayos X y termogravimetría. Obtuvieron diferentes composiciones de tierra para todos los puntos que contienen arenas silíceas ricas en cuarzo, feldespato y mica, además de cal en calcítica en los morteros de las mamposterías de piedra.

Ramakrishnan et al. (2021) analizaron 25 investigaciones relacionadas con el comportamiento de la materia orgánica (paja) en bloques de adobe. Identificaron la importancia de las propiedades en las fibras utilizadas. Concluyeron que el adobe

es una alternativa para la construcción debido al uso pocos recursos y baja energía en su producción. Mientras que Pachamama et al. (2024) evaluaron el estiércol de vaca añadido en 10% y 20% de proporción a morteros de Brasil y Portugal (Monsaraz y Caparica) mediante ensayos físicos y mecánicos. Observaron que la adición del 10% solo aumentó la resistencia a la compresión en un 15% en Caparica y en Brasil un 34%, mientras que en los de Monsaraz no se registró un cambio, sin embargo, en los tres casos se encontró una reducción de retracción lineal y agrietamiento, y un aumento en la fuerza adhesiva del 100%. Por otro lado, la adición del 20% es la más eficaz para que los morteros no se desintegren. Por su parte, Babé *et al.* (2021) analizaron en Camerún el efecto de adicionar fibras de neem en la durabilidad, comportamiento térmico y mecánico de ladrillos de adobe, realizando experimentación de laboratorio añadiendo 0, 1, 2, 3 y 4% a la mezcla. Encontraron que al adicionar entre 1 y 2% de su peso se obtiene una resistencia a la compresión mayor, mientras que el adicionar hasta un 3% mejora el coeficiente de absorción y con el 4% el coeficiente de erosión. Finalmente, las hojas de neem son de utilidad para brindar un mayor confort térmico a las viviendas.

En México, Sánchez Calvillo et al. (2024) estudiaron las propiedades físico-químicas y durabilidad de adobes históricos en el estado de Michoacán con muestras de dos edificios antiguos, localizados en La Huacana y Santa Cruz de Morelos. Observaron que los adobes presentan una composición diferente, caso del adobe de La Huacana que mostró una clasificación de arcilla de baja plasticidad o limo inorgánico con una resistencia a la compresión de 10.48±3.36 kg/cm2; mientras que el de Santa Cruz está compuesto por una arena arcillosa, resistencia a la compresión de 9.71±1.69 kg/cm2. En tanto que Catalán Quiroz et al. (2019) caracterizaron mecánicamente el adobe en diferentes partes del estado de Guerrero, realizando pruebas de resistencia a la compresión, cortante y flexión. Registrando resistencias de 12.24 kg/cm2, 1.12 kg/cm2 y 0.53 kg/cm2 respectivamente. Sin embargo, estos valores no pueden ser comparados con la normatividad para mampostería por la diferencia que existe en el comportamiento mecánico.

Esta investigación describe la caracterización del adobe en el estado de Guerrero, México a través de un estudio documental, de campo y análisis de laboratorio para medir la resistencia a la compresión, verificar la composición granulométrica y límites de consistencia para su clasificación. Obteniendo como resultados que el adobe se encuentra presente en toda la entidad en un 16% de las edificaciones residenciales, siendo Acatepec el municipio con mayor porcentaje de viviendas con muros de adobe. Las pruebas de laboratorio mostraron una resistencia a la compresión de 16.86 kg/cm2, una composición mayormente de agregado grueso, clasificándose como una arena limosa de baja compresibilidad.

2. METODOLOGÍA

La metodología aplicada se presenta en la Figura 1.

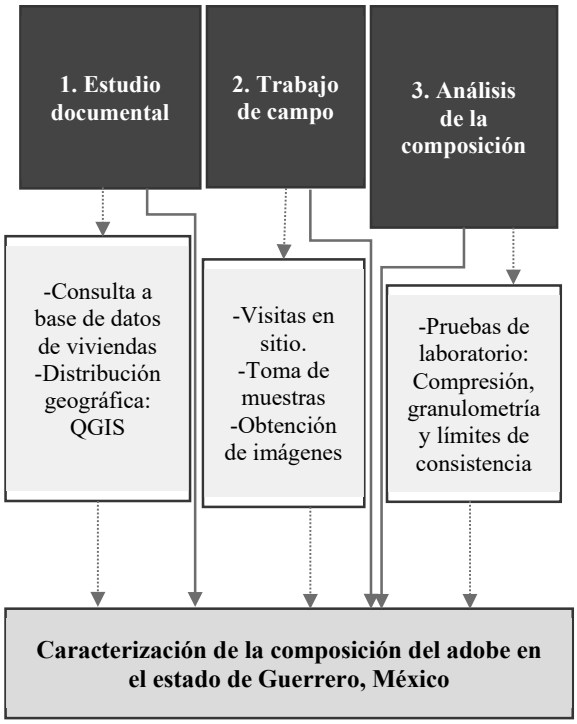


Figura 1. Metodología aplicada a la investigación

2.1 Área de estudio

El área de estudio se delimitó al estado de Guerrero, Figura 2.

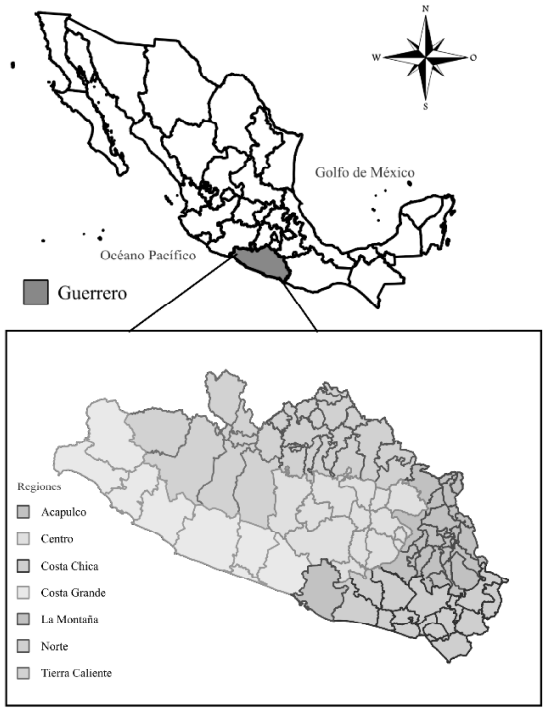


Figura 2. Área de estudio.

2.2 Estudio documental

La revisión incluyó el Censo de Población y Vivienda 2020 llevado a cabo en México, ya que el Cuestionario Ampliado considera el material de constricción para la vivienda. Además de documentación científica para conformar la base de datos, y con el sistema de información geográfica QGIS 3.40 se determinó la distribución espacial de la construcción vernácula de adobe en la entidad (Fuentes Pardo, 2023).

2.3 Trabajo de campo

Las visitas en sitio se realizaron en los municipios de San Luis Acatlán, Mochitlán, Alcozauca de Guerrero, Tlapa de Comonfort, San Jerónimo de Juárez y Chilapa de Álvarez, en donde se recopiló información sobre el proceso que se lleva a cabo para la creación de bloques de adobe, así como fotografías de viviendas construidas con este material y finalmente se recolectaron piezas de adobe para su análisis en laboratorio.

2.4 Análisis de la composición

El análisis las pruebas se realizó en el laboratorio de Ingeniería Civil del Instituto Tecnológico de Chilpancingo, en una muestra de 17 bloques de adobe, 16 de los cuales se sometieron a pruebas de compresión y en la pieza restante se hicieron pruebas de granulometría y límites de consistencia. Los especímenes se enumeraron para establecer sus características: largo, ancho, espesor, peso y área, Tabla 1, Figura 3.

Tabla 1a. Características de los especímenes, promedios.

Espécimen	Largo	Ancho	Espesor
No.	cm	cm	cm
1	38.3000	19.3000	9.2333
2	38.3333	19.1000	9.4333
3	38.4333	19.0333	9.5333
4	38.3667	19.1667	9.3667
5	38.9000	19.5000	9.4667
6	38.4667	19.1333	9.2000
7	38.5667	19.1333	9.3667
8	38.4667	19.1667	9.2333
9	38.3000	19.0667	9.1333
10	38.2667	19.2000	9.3333
11	38.4333	19.2333	9.2667
12	38.5333	19.1667	9.5000
13	38.3333	19.1000	9.4333
14	38.5333	19.1667	9.2000
15	38.5667	19.0333	9.3333
16	38.5333	19.2000	9.1667
17	38.3667	19.2000	9.5667

Tabla 1b Características de los especímenes, promedios.

Espécimen	Peso	Área
No.	kg	cm^2
1	11.44	739.1900
2	11.40	732.1667
3	11.32	731.5144
4	11.46	735.3611
5	11.52	758.5500
6	11.36	735.9956
7	11.54	737.9089
8	11.42	737.2778
9	11.22	730.2533
10	11.60	734.7200
11	11.38	739.2011
12	11.56	738.5556
13	11.58	732.1667
14	11.54	738.5556
15	11.48	734.0522
16	11.46	739.8400
17	11.56	736.6400

Figura 3. Identificación de especímenes.

2.4.1 Resistencia a la compresión

Para determinar la resistencia a la compresión los especímenes se cabecearon en ambas caras con mortero de azufre y así unificar las superficies antes de ser sometidos a la prueba con base a la NMX-C-109-ONNCCE-2013, Figura 4. La compresión se determinó adaptando los procesos descritos en las NMX-C-036-ONNCCE-2013, Figura 5, dado que en México no existe una normatividad para el ensaye de bloques de adobe (Catalán Quiroz *et al.*, 2019).

Figura 4. Ejemplo de espécimen cabeceado con azufre.

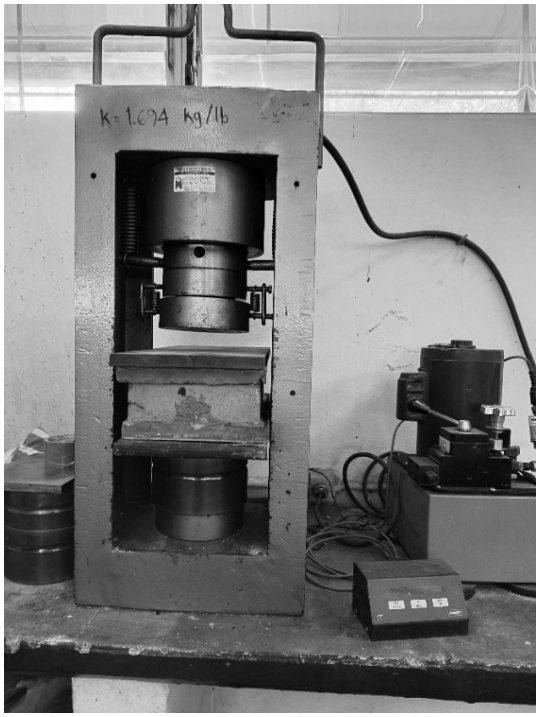


Figura 5. Preparación para prueba resistencia a la compresión.

Los valores obtenidos se dieron en libras (lb), por lo que para su cálculo en kilogramos (kg) se multiplico el valor obtenido por 1.694, valor equivalente a 1 kg proporcionado por el especialista al momento de calibrar el equipo.

2.4.2 Granulometría y límites de consistencia

La prueba de granulometría en el espécimen 17 consideró aproximadamente el 25% del bloque, con un peso de 3.12 kg. Para la separación de la materia orgánica se lavó y secó en horno, dejando solo el suelo del adobe, procediendo con el análisis granulométrico según la NMX-C-496-ONNCCE-2014, Figura 6.

Figura 6. Muestra tomada del espécimen 17.

El restante del espécimen se disgregó con ayuda de una masa de acero y se cribó en una malla #40, el material cribado se sometió a pruebas de límites de consistencia con base a la NMX-C-493-ONNCCE-2018, Figura 7.

Figura 7. Masa utilizada para disgregar la muestra.

Finalmente, con el apoyo de La Carta de Plasticidad y el Sistema Unificado Clasificación de Suelos (SUCS) se realiza la identificación del tipo de suelo con el que se realizaron los adobes.

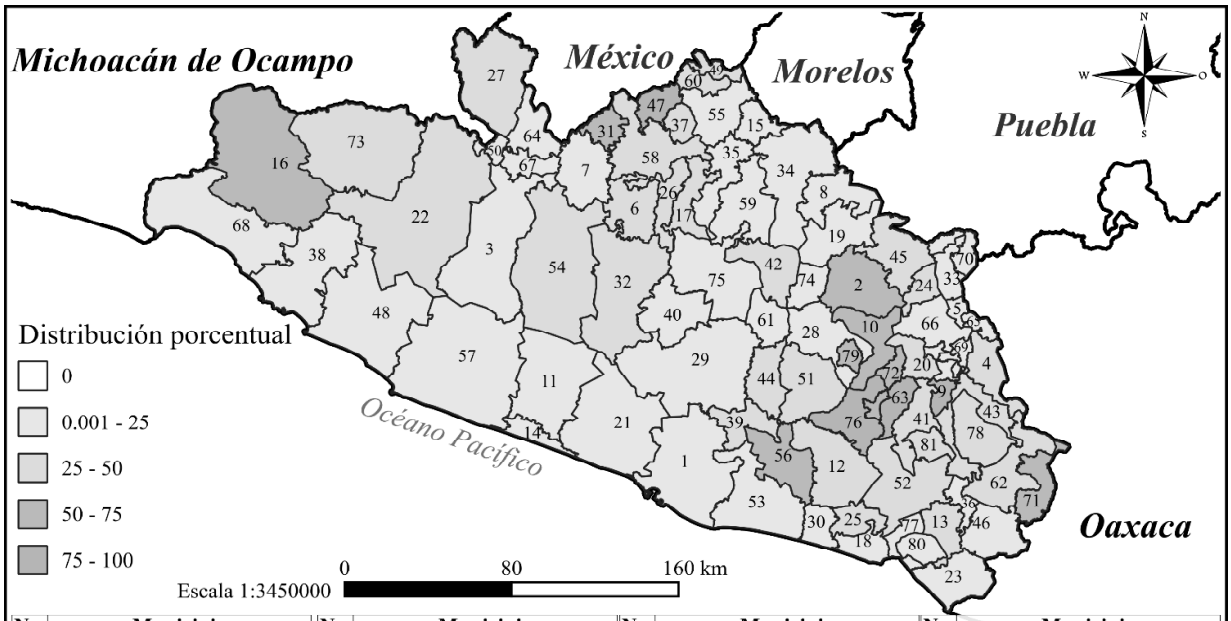
3. RESULTADOS

Se construyó una base de 154 datos con 22 ejemplares de los que se consideran siete variables: Región, Municipio, Localidad, Material, Composición, Técnica de aplicación y Descripción del material, Figura 8.

Con respecto al uso en el estado de Guerrero se identificó que el 16.66% de las viviendas están construidas con muros de adobe. El municipio con mayor implementación de adobe en sus construcciones es Acatepec con un 82.64%, seguido de Atlamajalcingo del Monte con 79.61% y Tlacoapa con 76.28%, Figura 9.

Región	Municipio	Localidad	Material	Composición	Técnica de aplicación	Descripción del material
Norte	Teloloapan	Teloloapan	Adobe	Arcillas extraidas del lugar con zacate, estiercol y agua	Muros	s/d
Centro	Chilpancingo de los Bravo	Chilpancingo de los Bravo	Adobe	Tierra local	Muros	s/d
…	…	…	…	…	…	…
Costa Chica	Todos	Todos	Adobe	Tierra y zacate	Muros	Junteado con la misma mezcla con la que se fabrican los bloques.

Figura 8. Fragmento de base de datos.



No.	Municipio	No.	Municipio	No.	Municipio	No.	Municipio
1	Acapulco de Juárez	21	Coyuca de Benítez	41	Malinaltepec	61	Tixtla de Guerrero
2	Ahuacuotzingo	22	Coyuca de Catalán	42	Mártir de Cuilapan	62	Tlacoachistlahuaca
3	Ajuchitlán del Progreso	23	Cuajinicuilapa	43	Metlatónoc	63	Tlacoapa
4	Alcozauca de Guerrero	24	Cualác	44	Mochitlán	64	Tlalchapa
5	Alpoyeca	25	Cuautepec	45	Olinalá	65	Tlalixtaquilla de Maldonado
6	Apaxtla	26	Cuetzala del Progreso	46	Ometepec	66	Tlapa de Comonfort
7	Arcelia	27	Cutzamala de Pinzón	47	Pedro Ascencio Alquisiras	67	Tlapehuala
8	Atenango del Río	28	Chilapa de Álvarez	48	Petatlán	68	La Unión de Isidoro Montes de Oca
9	Atlamajalcingo del Monte	29	Chilpancingo de los Bravo	49	Pilcaya	69	Xalpatláhuac
10	Atlixtac	30	Florencio Villarreal	50	Pungarabato	70	Xochihuehuetlán
11	Atoyac de Álvarez	31	General Canuto A. Neri	51	Quechultenango	71	Xochistlahuaca
12	Ayutla de los Libres	32	General Heliodoro Castillo	52	San Luis Acatlán	72	Zapotitlán Tablas
13	Azoyú	33	Huamuxtitlán	53	San Marcos	73	Zirándaro
14	Benito Juárez	34	Huitzuco de los Figueroa	54	San Miguel Totolapan	74	Zitlala
15	Buenavista de Cuéllar	35	Iguala de la Independencia	55	Taxco de Alarcón	75	Eduardo Neri
16	Coahuayutla de José María Izazaga	36	Igualapa	56	Tecoanapa	76	Acatepec
17	Cocula	37	Ixcateopan de Cuauhtémoc	57	Técpan de Galeana	77	Marquelia
18	Copala	38	Zihuatanejo de Azueta	58	Teloloapan	78	Cochoapa el Grande
19	Copalillo	39	Juan R. Escudero	59	Tepecoacuilco de Trujano	79	José Joaquín de Herrera
20	Copanatoyac	40	Leonardo Bravo	60	Tetipac	80	Juchitán
						81	Iliatenco

Figura 9. Distribución espacial de viviendas de adobe, INEGI (2020).

Se reconoció el uso del adobe en viviendas con una técnica de construcción similar en la aplicación con tabiques, blocks o tabicón. Detectando que la mezcla que se utiliza para unir las piezas de adobe es la misma con la que se fabrica, el empleo de cuñas o no para estabilizar sus muros; mientras que en otros materiales se utiliza un mortero a base de cemento, Figura 10 y 11.

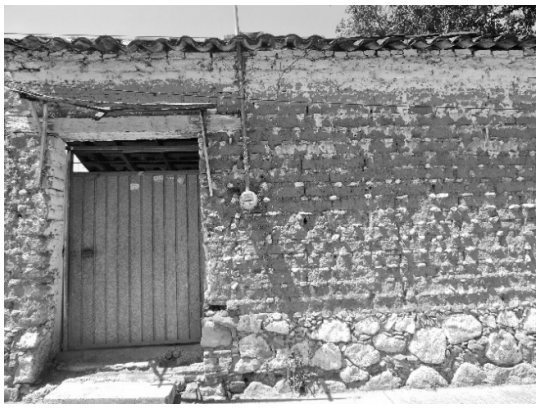


Figura 10. Muro de adobe con cuñas.

Figura 11. Muro de adobe sin cuñas.

El proceso de fabricación de bloques de adobe consta de la preparación y el amoldamiento de la mezcla. La preparación consiste en la extracción del suelo, apisonamiento y separación de rocas grandes, adición e incorporación de materia orgánica para ser transportada. Mientras que el amoldamiento se lleva a cabo en un lugar previamente acondicionado, cuidando que sea lo más parejo posible para no deformar las piezas. El material se acarrea y se coloca por partes en moldes de madera con las dimensiones deseadas, alisando por la parte superior para obtener bloques lo menos rugosos posible, se desmolda y se dejan secar entre 15 y 30 días, Figura 12 y 13.

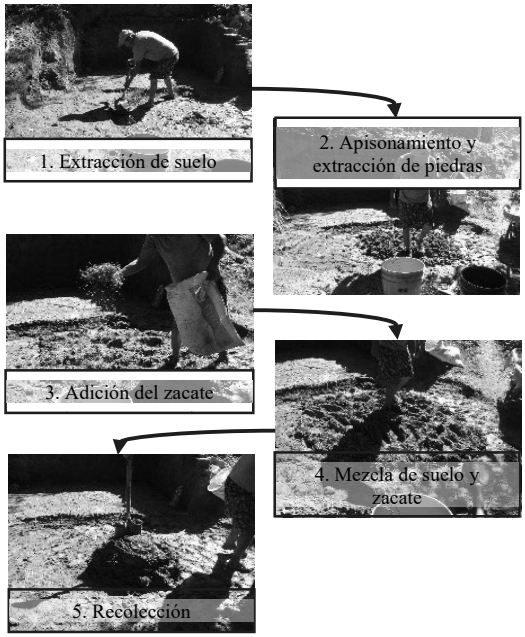


Figura 12. Proceso de preparación de la mezcla.

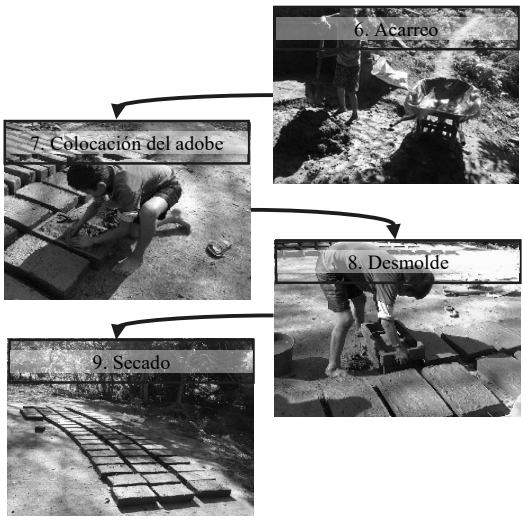


Figura 13. Proceso de amoldamiento de mezcla.

Las localidades que aun producen adobe, lo hacen con el propósito de edificar sus propias viviendas, sin embargo, no se cierran a la posibilidad de vender si se les solicita.

Los resultados del análisis de laboratorio se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de las pruebas de resistencia a la compresión.

Espécimen	Fuerza aplicada	Fuerza aplicada	Resistencia
No.	lb	kg	kg/cm^2
1	9,766	16,543.604	22.38
2	10,238	17,343.172	23.69
3	9,214	15,608.516	21.34
4	6,560	11,112.64	15.11
5	5,594	9,476.236	12.49
6	7,024	11,898.656	16.17
7	6,040	10,231.76	13.87
8	7,120	12,061.28	16.36
9	6,730	11,400.62	15.61
10	7,156	12,122.264	16.50
11	6,458	10,939.852	14.80
12	7,058	11,956.252	16.19
13	7,238	12,261.172	16.75
14	6,764	11,458.216	15.51
15	7,192	12,183.248	16.60
16	7,122	12,064.668	16.31
Promedio			16.86

La resistencia promedio en las pruebas realizadas fue de 16.86 kg/cm^2 con fallas típicas longitudinales presentadas en muestras rectangulares, Figura 14.

Figura 14. Espécimen ensayado.

En cuanto al peso de la muestra sin materia orgánica fue de 3,116 g, donde 19.49 g son gravas, 2,073.5 g arenas y 1,023g finos, representando 0.63%, 66.54% y 32.83% del peso total respectivamente y se observó que los adobes analizados cumplen con una porción de 3,116 g de suelo por 4 g de paja, Figura 15.

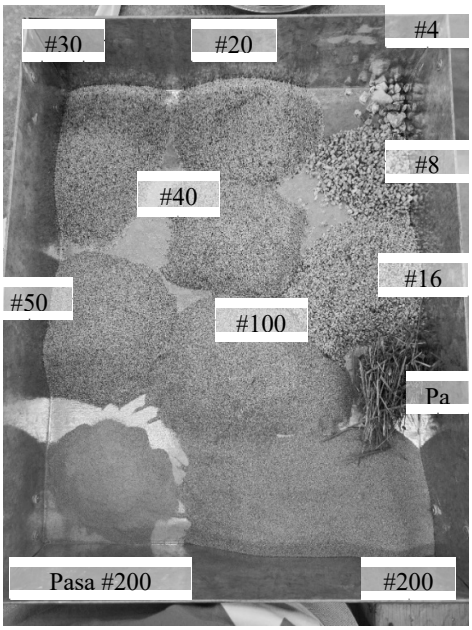


Figura 15. Retenidos por mallas.

La distribución porcentual de la granulometría por mallas mostró que el tamaño de agregado más grande corresponde al retenido en la malla #4 con una apertura de 4.75 mm, pasando el 99.37% de la muestra al tamizado de mallas correspondientes a las arenas, Figura 16.

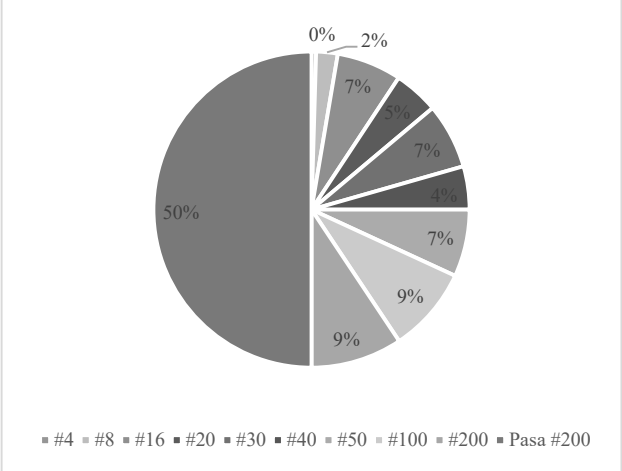


Figura 16. Porcentajes retenidos por malla.

Debido a que el porcentaje de finos rebasó el 12% en la malla #200, se realizaron pruebas de límites de consistencia. Encontrando un límite líquido del 43.70%, límite plástico del 27.61%, índice de plasticidad del 16.09% y una contracción lineal del 7.24%. La clasificación en la carta de plasticidad muestra que el suelo es un limo de baja plasticidad (ML), Figura 17.

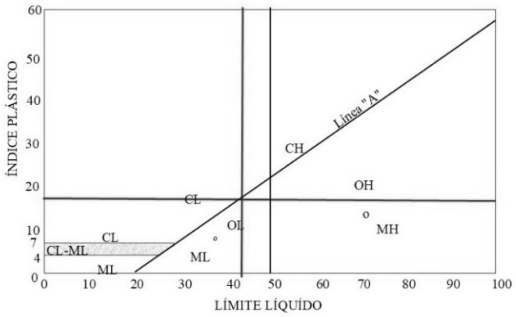


Figura 17. Carta de plasticidad para clasificar el suelo

Finalmente, el SUCS ubica la muestra como una Arena Limosa de Baja Compresibilidad (SML).

4. DISCUSIÓN

La elaboración del adobe como una mezcla de tierra arcillosa y materia orgánica (paja) utilizada para construir como con la mampostería de piedra en el estado de Guerrero se produce de manera similar a lo que describen Hu, (2023); Ramakrishnan et al. (2021); y Silva et al. (2022).

La resistencia obtenida en los ensayos de esta prueba fueron al menos 3 veces más que la mínima esperada de acuerdo a la reportada por Minke (2005) (5-50 kg/cm^2), y mayor a las de Catalán Quiroz et al. (2019) presentan una resistencia promedio de 12.54 kg/cm2 en Guerrero; y Sánchez Calvillo et al. (2024) quienes observaron 9.71 kg/cm2 y de 10.48 kg/cm2 en las pruebas realizadas en Michoacán.

5. CONCLUSIONES

El adobe como material de construcción es una alternativa para la edificación ante la situación climatológica que se vive al no tener una composición única o específica para su elaboración y la utilización de materiales locales. Su caracterización depende del tipo de suelo que se utilice, variando entre la predominancia de arcillas o arenas, y de las proporciones de suelo-materia orgánica que se utilicen, debido a que la materia orgánica puede variar entre paja, zacate, majada de burro o vaca, entre otros.

REFERENCIAS

Babé, C., Kidmo, D.K., Tom, A., Mvondo, R.R.N., Kola, B. and Djongyang, N. (2021), "Effect of neem (Azadirachta Indica) fibers on mechanical, thermal and durability properties of adobe bricks", *Energy Reports*, Elsevier Ltd, Vol. 7, pp. 686–698, doi: 10.1016/j.egyr.2021.07.085.

Catalán Quiroz, P., Moreno Martínez, J.Y., Galván, A. and Arroyo Matus, R. (2019), "Obtención de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe mediante ensayes de laboratorio".

Enshassi, A., Kochendoerfer, B. and Rizq, E. (2014), *An Evaluation of Environmental Impacts of Construction Projects Evaluación de Los Impactos Medioambientales de Los Proyectos de Construcción*.

Fuentes Pardo, J.M. (2023), "Challenges and Current Research Trends for Vernacular Architecture in a Global World: A Literature Review", *Buildings*, MDPI, Vol. 13 No. 1, doi: 10.3390/buildings13010162.

Gomes, R.I., Santos Silva, A., Gomes, L. and Faria, P. (2022), "Fernandina Wall of Lisbon: Mineralogical and Chemical Characterization of Rammed Earth and Masonry Mortars", *Minerals*, MDPI AG, Vol. 12 No. 2, p. 241, doi: 10.3390/min12020241.

Hu, M. (2023), "Exploring Low-Carbon Design and Construction Techniques: Lessons from Vernacular Architecture", *Climate*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 1 August, doi: 10.3390/cli11080165.

Martínes, J.S., Barros, E., Padrón, K., Aguirre, J., Matasci, C., Crenna, E., Gauch, M., *et al.* (2025), "Assessing the Sustainability of Local Construction Materials in Ecuador Through an Interdisciplinary Approach", *Sustainability (Switzerland)*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Vol. 17 No. 5, doi: 10.3390/su17051775.

Minke, G. (2005), *MANUAL DE CONSTRUCCIÓN EN TIERRA*, translated by Harzfeld, K., Loayza, R. and Peterssen, G., Fin de Siglo.

Pachamama, R.N., Faria, P., Rezende, M.A.P. and Santos Silva, A. (2024), "Effect of Cow Dung Additions on Tropical and Mediterranean Earth Mortars-Mechanical Performance and Water Resistance", *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Vol. 17 No. 12, doi: 10.3390/ma17122885.

Ramakrishnan, S., Loganayagan, S., Kowshika, G., Ramprakash, C. and Aruneshwaran, M. (2021), "Adobe blocks reinforced with natural fibres: A review", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 45, Elsevier Ltd, India, pp. 6493–6499, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.377.

Sánchez Calvillo, A., Alonso Guzmán, E.M., Navarro Ezquerra, A., Ruiz Mendoza, M., Martínez Molina, W., Álvarez Galindo, J.I. and Rincón, L. (2024), "Physical-chemical, mechanical and durability characterization of historical adobe buildings from the State of Michoacan, Mexico", *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, Vol. 86, doi: 10.1016/j.jobe.2024.108802.

Sánchez-Calvillo, A., Rincón, L., Hamard, E. and Faria, P. (2024), "Bibliometric Analysis on Earthen Building: Approaches from the Scientific Literature and Future Trends", *Buildings*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 1 December, doi: 10.3390/buildings14123870.

Silva, A., Oliveira, I., Silva, V., Mirão, J. and Faria, P. (2022), "Vernacular Caramel´s Adobe Masonry Dwellings–Material Characterization", *International Journal of Architectural Heritage*, Taylor and Francis Ltd., Vol. 16 No. 1, pp. 67–84, doi: 10.1080/15583058.2020.1751343.

UNEP. (2023), *Building Materials and the Climate: Constructing a New Future*.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Innovative Technologies That Contribute to the Circularity and Sustainability of the Tourism Sector in Morelos

Macias-Martinez Cristian Clemente*, Hernández-Castañeda Daniela*, Gómez-Aguilar José Francisco**

**Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Int. Internado Palmira S/N, C.P. 62490. Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos, México*
(email: m24ce101@cenidet.tecnm.mx, daniela.hc@cenidet.tecnm.mx)
*** Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp-IICBA)/UAEM. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, México*
(e-mail: jose.ga@uaem.mx)

Abstract: One of the sectors with the most economic units in the state of Morelos is the hotel and tourism sector. Establishments in this sector are deficient in their adherence to a circular economy model, as most still follow a linear economic model in which resources are simply taken and discarded. This leads to inefficient use of resources and poor waste management. Innovative technologies have emerged in response to this issue, following circular economy principles that contribute to improving the sustainability of the state. The results obtained demonstrate that sustainability and circularity in the state of Morelos are still at a low level of development, as the use of technologies in this sector is primarily aimed at providing more efficient services to its customers, but does not consider the balance between the economic, social, and environmental pillars.

Keywords: Innovative Technologies, Circular Economy, Sustainability, Hotel and Tourism.

1. INTRODUCCIÓN

El sector de hostelería y turismo en México ha cobrado relevancia en los últimos años debido a su aporte al desarrollo económico y social del país. Tan solo en 2023, la Secretaría de Turismo de México reveló una tasa de crecimiento en el PIB (Producto Interno Bruto) de 4.4.% respecto al periodo anual anterior, mientras que las actividades relacionadas con este sector generaron alrededor de 2.8 millones de empleos directos, lo que representa un crecimiento de 3.1% respecto a 2022.

Las principales actividades que contribuyeron a dicho PIB fueron los servicios de alojamiento y hospedaje (20.9%), el transporte de pasajeros (19%), los alimentos y bebidas (15.7%) y los bienes y artesanías (13.9%) (SECTUR, 2023).

A pesar de ser un sector indispensable para la economía mexicana, las actividades que se realizan en los establecimientos turísticos han generado importantes problemas ambientales, como la contaminación, el uso desmedido de recursos (agua, electricidad, etc.), la degradación de ecosistemas, la pérdida de biodiversidad, entre otros. Estos problemas hacen indispensable adoptar modelos económicos que integren los tres pilares de la sostenibilidad: económico, social y ambiental (Boronat Navarro & Puig Denia, 2020).

Hoy en día, algunos establecimientos de hospedaje y restaurantes ya están tomando conciencia del impacto que generan sus actividades. En el estado de Morelos, han adoptado prácticas basadas en el uso de tecnologías innovadoras y en el modelo de economía circular, las cuales contribuyen a reducir el consumo y uso de recursos.

El seguimiento de los principios de este modelo puede ser una solución eficaz para preservar los abundantes recursos naturales del estado, así como su riqueza histórica, cultural y las comunidades locales. Además, los establecimientos que implementan estas prácticas y tecnologías logran ser más competitivos, al ofrecer un servicio más eficiente y de mejor calidad.

Este artículo se divide en 6 secciones principales, comenzando con los fundamentos conceptuales de esta investigación. Después, se retoma el concepto de sostenibilidad ahora aplicado a la hostelería y turismo del estado de Morelos. Posteriormente se aborda la situación actual que atraviesan las unidades de hospedaje y restaurantes y, seguido de ello, se presenta cómo el uso de tecnologías innovadoras ha impactado en la economía circular y sostenibilidad de este estado. Finalmente, la última sección presenta conclusiones del trabajo realizado.

2. MARCO CONCEPTUAL

En este apartado se destacan los conceptos principales para el desarrollo de esta investigación.

2.1. Tecnologías Innovadoras

Se clasifican así los tipos de tecnologías destinadas a crear o regenerar bienes, servicios o modelos de negocio. Estas tecnologías buscan renovar procesos dentro de las organizaciones, sin importar su giro, agregando valor a sus operaciones y generando ventaja competitiva. Su adopción puede conseguir reconocimiento y prestigio, haciendo que las organizaciones que las implementan sean más visibles y valoradas (Aguirre Ezequiel, 2024).

2.2. Economía circular

Es un modelo económico reconstituyente y regenerativo que propone mantener siempre los productos, componentes y materiales en uso continuo, promoviendo la preservación y el cuidado del medio ambiente, optimizando el aprovechamiento de los recursos naturales y minimizando los desechos generados por las personas y las empresas (Prieto et al., 2019).

2.2.1. Principios de la economía circular

El primer principio de este modelo consiste en la reducción, que busca minimizar el uso de materias primas en las operaciones empresariales y en la vida cotidiana, al mismo tiempo que se generan menos desechos en sus procesos. El segundo principio es el reciclaje, que implica aprovechar los residuos de manera eficiente. Por último, el principio de la reutilización, que consiste en volver a utilizar un bien o material, ya sea para el mismo fin a para la fabricación de algo totalmente nuevo (PROFECO, 2023).

2.3. Sostenibilidad

La sostenibilidad implica un desarrollo de las comunidades que satisfaga las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras. Es decir, busca enfrentar la degradación y la sobreexplotación del medio ambiente y sus recursos, promoviendo la transformación de un modelo de desarrollo que, en décadas pasadas, priorizaba el crecimiento económico a costa del uso excesivo de los recursos naturales.

Existe una diferencia entre sostenibilidad y sustentabilidad. La sostenibilidad se enfoca en tres pilares: económico, social y ambiental; a través de objetivos políticos y culturales, mientras que la sustentabilidad hace énfasis en el aspecto ambiental y no profundiza en los demás aspectos (United Nations, 2021).

2.3.1. Pilares de la sostenibilidad

La sostenibilidad se basa en tres pilares: ambiental, económico y social. El pilar ambiental se enfoca en la conservación de la biodiversidad mediante la creación de estrategias para el manejo de residuos, la reducción en la explotación de los recursos naturales y el desarrollo de energías renovables, entre otros. El pilar económico busca generar riqueza sin hacer un uso excesivo de los recursos naturales, equilibrando la oferta y demanda de productos. Por último, el pilar social garantiza la calidad de vida de las personas, asegurando su acceso a bienes y servicios necesarios para satisfacer necesidades básicas como alimentación, salud y seguridad (Lira A., 2018).

3. SOSTENIBILIDAD EN LA HOSTELERÍA Y TURISMO EN EL ESTADO DE MORELOS

3.1. Punto de vista económico

En Morelos, la economía presentó un PIB nominal de 337,622 millones de pesos, conformados por las activades primeras, con un 3.7% de participación; las secundarias, con 28.8%; y las terciaras con 61.7%, siendo esta última la actividad donde se desarrolla el turismo. Por último, los subsidios y los impuestos netos representan un 5.8% de participación (INEGI, 2024).

El estado se encuentra dividido en 36 municipios, indicados en la Figura 1, de los cuales Cuernavaca, Cuautla, Jiutepec, Temixco y Yautepec registraron la mayor cantidad de unidades económicas, según el último censo realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

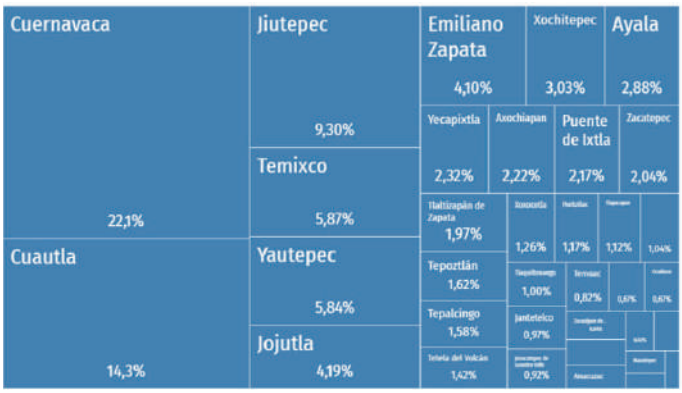


Figura 1: Unidades económicas por municipio.

De acuerdo con este censo, los sectores con mayor número de establecimientos económicos fueron el comercio al por menor, con 44,009 unidades; los servicios de alojamiento y preparación de alimentos, con 14,365; y, por último, los servicios no gubernamentales, con 13,520 como se muestra en la Figura 2 (Gobierno de México, 2020).

Figura 2: Porcentaje de unidades económicas por sector.

Los servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas están directamente relacionadas con el turismo, ya que muchos de ellos ofrecen a los turistas experiencias que mejoran su estadía y el disfrute de los atractivos de Morelos. Estos servicios no solo impulsan la economía, sino que también generan impactos sociales y ambientales.

3.2. Punto de vista ambiental

Actualmente, el sector turístico sigue un modelo lineal de producción y consumo, es decir, extracción, producción, consumo y desecho, lo que agota los recursos y genera residuos a niveles alarmantes, no solo en este estado, sino también a nivel nacional e internacional.

El turismo se ha clasificado como una de las industrias con mayor potencial para generar un cambio a favor de la sostenibilidad, contribuyendo positivamente mediante acciones políticas y prácticas en sus servicios e instalaciones. Aunque el sector trabaja constantemente para mitigar el impacto ambiental de sus actividades, aún existen establecimientos que carecen de una gestión adecuada de los recursos, lo que afecta principalmente a la localidad donde se encuentran (Cárdenas, 2019).

Se ha identificado que los principales impactos ambientales que generan tanto hoteles como restaurantes consisten en la contaminación por consumo excesivo y falta de aprovechamiento. La Figura 3 enuncia dichos problemas.

Figura 3: Problemas e impacto ambiental del sector de hostelería y turismo.

3.2.1. Contaminación del agua

Diversas actividades en esta industria requieren el uso constante de agua, un recurso básico para su funcionamiento. Se utiliza principalmente para lavado, limpieza, higiene y atención a los clientes, lo que a menudo conlleva un uso ineficiente y desperdicio significativo.

Por tal motivo, la producción de aguas residuales provenientes de baños, lavandería y limpieza de las instalaciones es muy alta, lo que genera contaminación. Estas aguas suelen descargarse en la red de alcantarillado, sin emplear algún tipo de tratamiento, en cuerpos de agua naturales, terrenos baldíos o son utilizadas en prácticas inadecuadas, como en el riego de cultivos, lo que representa un riesgo tanto ambiental como para la salud de las personas (Rodríguez et al. 2017).

3.2.2. Contaminación del suelo y aire por residuos sólidos

El vertimiento de residuos directamente sobre el suelo puede ocasionar su contaminación, reduciendo la eficacia de sus nutrientes y disminuyendo su fertilidad para el cultivo. En casos más graves, la acumulación de sustancias tóxicas puede dañar los ecosistemas.

Los desechos generados por este sector representan un problema ambiental debido a la falta de una gestión adecuada de residuos. Gran parte de estos desechos se clasifica como ordinaria, e incluye principalmente los residuos de alimentos, aceites y materiales susceptibles de un segundo uso, como papel, cartón, vidrio, aluminio y plástico (Areniz, 2021).

3.2.3. Afectación de la flora y fauna

La construcción de hoteles y restaurantes tiene un gran impacto en el medio ambiente, no solo por el tipo de edificación, sino también por la construcción en zonas naturales protegidas. Este impacto puede analizarse desde dos perspectivas: a nivel urbano, cuando se construye en ciudades, y a nivel rural, cuando se construye en áreas de considerable riqueza ambiental, por el atractivo que le genera a las personas.

La flora y la fauna puede verse afectadas, ya que la construcción de infraestructura puede implicar la tala y remoción de especies de flora que se ubican en el lugar, al mismo tiempo que provoca el desplazamiento de especies animales o, en casos extremos, su extinción (Lacruhy & Aguirre, 2024).

3.2.4. Contaminación atmosférica

Uno de los principales medios que contribuyen a la contaminación atmosférica es el transporte, el cual está directamente relacionado con la actividad turística. Ya sea terrestre, aéreo o acuático, todos forman parte del turismo, ya que permiten relacionarse con cada uno de los alojamientos de hospedaje, restaurantes y atractivos turísticos.

Los contaminantes generados por el transporte afectan la calidad del aire debido a la quema de combustible durante su uso, lo que impacta en la salud de las personas expuestas a estas partículas durante períodos prolongados (Ochoa et al., 2022).

3.2.5. Consumo de energía eléctrica

La energía eléctrica es fundamental en esta industria, no solo para brindar servicios de hospedaje y alimentación, sino también para ofrecer comodidades y experiencias a los usuarios. Equipos como iluminación, calefacción, televisores, calentadores y computadoras dependen de esta energía para funcionar.

Con frecuencia, estos equipos permanecen encendidos innecesariamente, lo que genera un consumo excesivo de energía, aumenta la emisión de gases y acelera el cambio climático. Aunque existen alternativas de energías renovables para reducir el consumo de electricidad, muchos establecimientos no implementan cambios, ya sea por resistencia o por otras causas (Maciel, 2022).

3.3. Punto de vista social

La hostelería y turismo en Morelos representa una herramienta importante para el desarrollo regional. Este sector no solo es generador de empleos directos e indirectos para miles de personas, sino que también permite a residentes y visitantes conocer la riqueza del estado. Es importante destacar que la cantidad de empleos suele depender, en gran medida, de la temporada turística.

La Secretaría de Turismo de Morelos impulsa estrategias de desarrollo sostenible que promuevan la historia, la naturaleza, las costumbres, las tradiciones y la gastronomía, generando experiencias únicas a todos los visitantes que beneficien tanto a las autoridades como a las comunidades del estado.

Es importante mantener un equilibro para que realmente se vean reflejados estos beneficios, ya que una regulación inadecuada puede afectar variables como el estilo de vida, la cultura tradicional, los niveles de seguridad e incluso el tamaño de la población (Sandoval et al., 2022).

4. NIVELES DE SOSTENIBILIDAD Y CIRCULARIDAD EN MORELOS

Una encuesta aplicada a 28 establecimientos de alojamiento temporal y preparación de alimentos y bebidas muestra información relevante sobre los usos de tecnologías que se están implementando a favor de la sostenibilidad y circularidad.

El inicio de esta encuesta comenzó evaluando el nivel de conciencia de estas organizaciones respecto al impacto ambiental de sus actividades en el ambiente. Aunque la mayoría respondió ser muy consciente, como se observa en la Figura 4, en una escala del 1 al 5 (donde 1 es poco y 5 mucho), sus prácticas indican lo contrario.

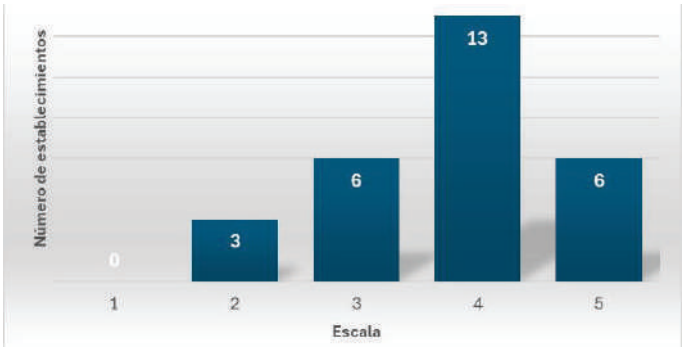


Figura 4: Nivel de conciencia.

Otra de las preguntas importantes para determinar el nivel de consciencia se relacionó con el seguimiento de políticas ambientales. En la Figura 5, más de la mitad de los establecimientos (15 en total) no cuentan con ninguna política ambiental, lo que indica que la sostenibilidad y circularidad no son prioritarias en sus operaciones y refleja el desconocimiento sobre el tema. Además, las pocas unidades hoteleras y restauranteras que sí implementan políticas se enfocan en el "uso y consumo responsable", sin contar con mecanismos para medir su efectividad.

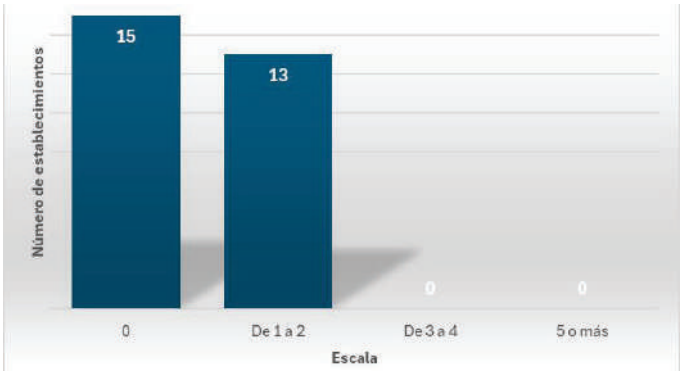


Figura 5: Políticas ambientales.

De los establecimientos encuestados, 22 no tienen ningún conocimiento del modelo de economía circular y sólo 6 han escuchado hablar de él. Esto podría significar que implementar estrategias y sistemas de gestión para reducir los desechos generados por estas actividades podría ser más difícil.

Los sistemas de gestión de los establecimientos encuestados se basan en la separación de la basura en distintos contenedores para facilitar su recolección. Elementos como el plástico, vidrio y cartón son recolectados para un posible aprovechamiento; sin embargo, debido a la gran cantidad de desechos que se generan, esta medida resulta insuficiente.

Esto da como resultado que los niveles de sostenibilidad y circularidad en este estado son alarmantemente bajos. A pesar de sus respuestas anteriores, 5 hoteles y/o restaurantes afirmaron encontrarse en un nivel de sostenibilidad "alto" con

sus prácticas y herramientas actuales; 8 consideran que sus acciones no benefician ni perjudican al medio ambiente; y 15 reconocen estar en un nivel "bajo", como lo indica la figura 6.

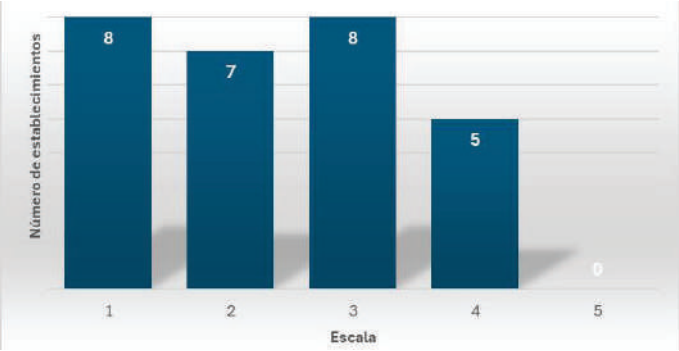


Figura 6: Nivel de sostenibilidad.

En cuanto a la circularidad, en la Figura 7 es notable que 25 de los establecimientos reconocieron tener un nivel bajo o nulo en sus operaciones, mientras que 3 se mostraron conformes con la gestión que realizan actualmente.

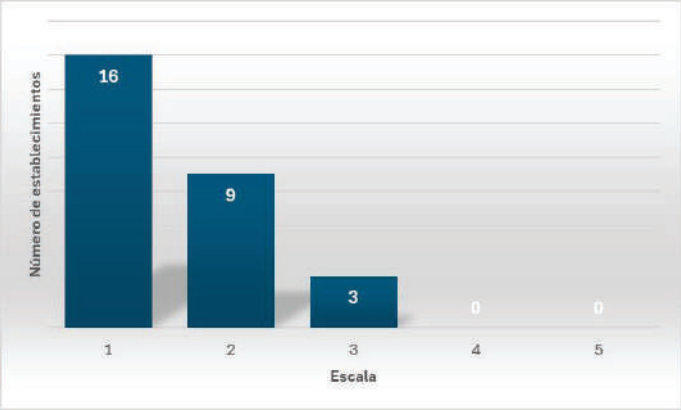


Figura 7: Nivel de circularidad.

5. TECNOLOGÍAS INNOVADORAS EN LA ECONOMÍA CIRCULAR

El uso de tecnologías en alojamientos de servicios de hospedaje temporal y preparación de alimentos y bebidas no es un caso aislado, ya que se emplean para mejorar la eficiencia, la operatividad y los procesos internos y externos. Sin embargo, muchas de estas tecnologías, aunque efectivas, no consideran los impactos negativos que generan en el cumplimiento del modelo de economía circular.

En la hostelería y turismo de Morelos se hace uso de herramientas tecnológicas como el celular móvil y computadoras para acceder a servicios y mejorar procesos entre cliente-empresa. Estas tecnologías pueden clasificarse como innovadoras, sin embargo, no contemplan el enfoque de sostenibilidad.

Con ayuda de la encuesta aplicada, se identificaron tecnologías innovadoras y prácticas sostenibles que pueden contribuir al cumplimiento del modelo de economía circular. Estas tecnologías se destacan por su accesibilidad y adaptabilidad en distintos sectores, no solo en el turístico.

Entre las tecnologías innovadoras, destacan los sistemas de captación de agua pluvial, que permiten almacenar y aprovechar el agua de lluvia para actividades como limpieza o riego, tanto en unidades de hospedaje como en servicios de alimentos y bebidas, contribuyendo a la sostenibilidad y a la implementación del modelo de economía circular.

Una de las principales técnicas de este sistema consiste en almacenar previamente el agua de lluvia sin tratar, que comúnmente es utilizada para el riego. Posteriormente, mediante filtros, el agua se purifica y se puede evaluar su calidad para determinar si es adecuada para usarse en otras actividades. (Calzadilla et al., 2020).

Otra tecnología relevante es la instalación de paneles solares. Su implementación contribuye a la sostenibilidad al transformar la luz solar en energía eléctrica. Este tipo de energía renovable alimenta diversos equipos sin incrementar los costos. La economía circular surge cuando, al final de su vida útil, los materiales que lo componen son reutilizados para su aprovechamiento en otros procesos (Andrade et al., 2022).

Los paneles solares ofrecen múltiples beneficios, ya que, al aprovechar un recurso ilimitado como la energía solar, pueden mejorar procesos, reemplazar el uso de combustibles fósiles para generar electricidad o reducir contaminantes. En el estudio de sostenibilidad y circularidad, 7 unidades hacen uso de energías renovables en sus operaciones, como lo muestra la Figura 8, sobresaliendo el uso de energía solar.

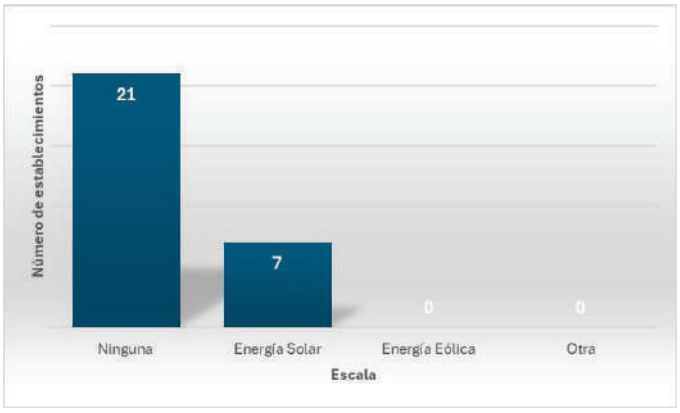


Figura 8: Uso de energías renovables.

Aunque el estado de Morelos aún se encuentra en transición hacia modelos más circulares y sostenibles, en este sector se han implementado algunas prácticas que involucran tecnología y que cooperan en la gestión y reducción de residuos. Entre ellas

destacan el aprovechamiento de desechos orgánicos mediante compostaje para sus áreas verdes y la instalación de sensores en baños y regaderas (según el caso) para regular el consumo de agua.

Algunas recomendaciones que, aunque no todas involucran el uso de tecnologías, sí pueden contribuir a un mejor manejo de residuos en restaurantes y hoteles son el compostaje, ya que muchos residuos orgánicos suelen aprovecharse para mantener en buenas condiciones áreas verdes, lo que ayuda a sustituir recursos como el agua y en algunos casos hasta fertilizantes.

También, prácticas como la eliminación de plásticos de un solo uso puede marcar la diferencia en la disminución de desechos, debido a que estos forman parte de muchos establecimientos de alimentos y bebidas y fácilmente se podrían sustituir con vajillas o con materiales más amigables con el ambiente como el cartón reciclado o papel kraft.

6. CONCLUSIONES

Morelos aún presenta deficiencias en la gestión de residuos para alcanzar niveles óptimos de sostenibilidad y circularidad. Entre las causas, la Figura 9 muestra que 13 alojamientos expresaron que el principal obstáculo es la "resistencia al cambio", debido a que en muchas ocasiones sus políticas y lineamientos están muy arraigados, lo cual dificulta la modificación o implementación de nuevas prácticas.

Otros 7 establecimientos consideran que la "falta de políticas" provoca que la implementación de prácticas para el cuidado del medio ambiente sea opcional. Para 5 establecimientos, el principal obstáculo es de índole "económico", debido a la inversión necesaria que no siempre está disponible. Por último, 3 unidades señalan que el "desconocimiento" del tema limita la adopción de medidas sostenibles.

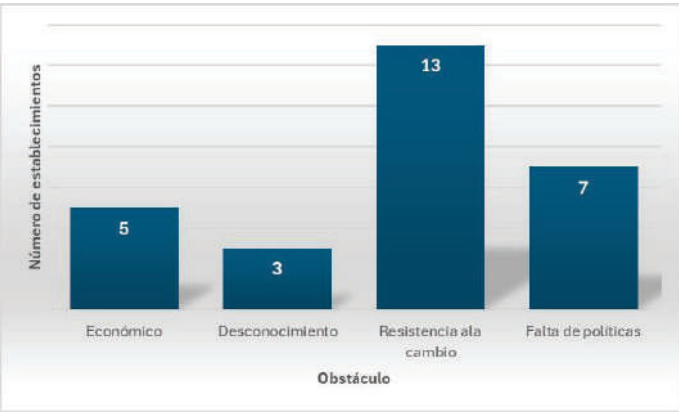


Figura 9: Obstáculos de la sostenibilidad y circularidad.

La transición hacia un modelo de economía circular que considere la sostenibilidad puede tomar muchos años. En la Figura 10 se observa que 13 encuestados estiman un plazo de "11 a 20 años", 8 opinan que llevará "más de 20 años" y 7 consideran que tomará de "5 a 10 años".

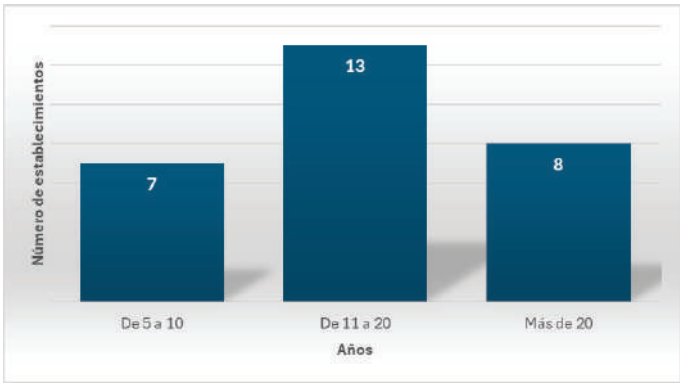


Figura 10: Futuro de la sostenibilidad y circularidad.

Aunque existen establecimientos que utilizan tecnologías que favorecen el modelo de economía circular, la mayoría se resiste a adoptar estas herramientas y prácticas, lo que dificulta alcanzar un nivel adecuado de sostenibilidad en el estado de Morelos. Si bien no se puede imponer el uso de tecnologías amigables con el medio ambiente, sí es posible proporcionar información sobre las opciones disponibles para generar un cambio y los efectos de su adopción, con el fin de promover decisiones más conscientes.

AGRADECIMIENTOS

Cristian Clemente Macías Martínez agradece el apoyo brindado por el SECIHTI mediante la asignación de una beca de Maestría. José Francisco Gómez Aguilar agradece el apoyo brindado por el SNII-SECIHTI.

REFERENCIAS

Aguirre, E. (2024). Tecnologías innovadoras digitales en apoyo a la participación de las pymes en el comercio electrónico transfronterizo. Naciones Unidas. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). http://repositorio.cepal.org/handle/11362/68968

Andrade Villarreal, J. V., Álvarez Játiva, L. H., Romero Astudillo, J. P., & Bonifaz Aguinaga, F. X. (2022). Los paneles solares como elementos sostenibles del turismo en zonas costeras. Polo del Conocimiento, 7(6), 957-969. https://doi.org/10.23857/pc.v7i6

Areniz, J. (2021). Impactos Ambientales Asociados a la Hotelería. Energía y Sostenibilidad. https://energiaysostenibilidad.com/impactos-ambientales-asociados-a-la-hoteleria/

Boronat Navarro, M., & Puig-Denia, A. (2020). Cooperación en destinos y economía circular. Universidad Jaime I. Economía Industrial, 125-132. https://www.mintur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesp

eriodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/418/

Calzadilla, M. P. R., Arias, A. G., Fernández, R. M., Cansino, V. C., & Díaz, O. M. (2020). Estudio de las precipitaciones para el diseño de sistema de captación de agua de lluvia. Revista Ingeniería Agrícola, 10(2), 28-36. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586263256005

Cárdenas Bocanegra, H. A. (2019). Riesgos ambientales y sociales en hoteles, restaurantes y estaciones de servicio. En Pilotos de innovación financiera. Negocios verdes (pp. 1-58). https://www.asobancaria.com/wp-content/uploads/2020/10/Riesgos-Ambientales-y-Sociales-sector-Hoteles-restaurantes-y-EDS-1.pdf

Gobierno de México. (2020). Morelos: Economía, empleo, equidad, calidad de vida, educación, salud y seguridad pública | Data México. Data México. https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/morelos-mo

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). Producto Interno Bruto por Entidad Federativa (PIBE), Morelos. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2024/PIBEF/PIBEF2023_Mor.pdf

Lacruhy Enríquez, C. C., & Aguirre Osuna, L. (2024). Normatividad y percepción del turismo sostenible en un área de protección de flora y fauna en México. European Public & Social Innovation Review, 10, 01–20. https://doi.org/10.31637/epsir-2025-1214

Lira, A. (2018). Introducción al concepto de sostenibilidad. Unidades de Apoyo para el Aprendizaje. CUAED/Facultad de Arquitectura-UNAM. https://uapa.cuaed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/-f02c-43c2-8222-498e1e8b8814/693ee8e8ConceptoSostenibilidad/

Maciel, A. D., Poggi, E., Gutiérrez, F., & Hazuda, Y. (2022). Uso racional y eficiencia energética aplicado a hoteles. Vol. 1, 29-34 https://edicionesfhycs.fhycs.unam.edu.ar/index.php/tekoha/article/viewFile/7/5

Ochoa-Avila, M. B., & Pelegrino-Enamorado, G. (2022). Contribución a la gestión ambiental en hoteles encanto del destino Holguín. Ciencias Holguín, 28(4). https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181574283007

Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2019). Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación (p. 15). https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/53653/1/Economia_Circular.pdf

Procuraduría Federal del Consumidor (2023). Economía Circular. Gobierno de México. https://www.gob.mx/profeco/es/articulos/economia-circular

Rodríguez Robaina, C., Florido, C., & Jacob, M. (2017). Economía circular y turismo en las Islas Canarias. Congreso Internacional "Desarrollo integral de destinos turísticos", 66-76 https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Rodriguez-Robaina/publication/358798683.pdf

Sandoval, E., Ramos, G. & Correa, A. (2022). Midiendo la economía circular en México. Realidad, datos y espacio revista internacional de estadística y geografía. https://rde.inegi.org.mx/index.php/2023/01/04/midiendo-la-economia-circular-en-mexico/

Secretaría de Turismo. (2024). PIB Turístico creció 4.4 por ciento, ascendió a 2 billones 582 mil. Gobierno de México https://www.gob.mx/sectur/articulos/pib-turistico-crecio-4-4-por-ciento-ascendio-a-2-billones-582-mil-millones-de-pesos

United Nations. (2021). Sostenibilidad. Naciones Unidas. United Nations; United Nations. https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/sostenibilidad

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

The kilogram in the International System of Units: Defining Constants and their Implementation in Mexico

M. Thadeo*, L. Lira, J. Arce***

**Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET). Interior Internado Palmira s/n, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos. (Tel. +52 (777) 3627770; e-mail: mariana.thadeo@gmail.com;jesus.al@cenidet.tecnm.mx).*

*** Centro Nacional de Metrología (CENAM), Km 4.5 carretera a los Cues, C.P. 76246 Municipio del Marqués, Querétaro, (Tel. +52 (442) 211-05-00 al 04; e-mail: llira@cenam.mx).*

Abstract: The International System of Units (SI) which originated in the metric system of the 18th century and was formalized in 1875 by the Metre Convention was established in 1960 to unify measurements through seven base units and seven defining constants, although these constants are not in a one to one relationship with the units. The International Bureau of Weights and Measures (BIPM) coordinates global metrology; the General Conference on Weights and Measures (CGPM) approves the system's resolutions; the International Committee for Weights and Measures (CIPM) provides scientific guidance; and the ten Consultative Committees (CCs) develop methods and standards. Mexico adopted the system in 1865 and, through the National Metrology Center (CENAM), participated in efforts to redefine the kilogram using Planck's constant.

Keywords: International System of Units; Base Units; Derived Units; the kilogram; International Prototype of the Kilogram; Planck Constant.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema métrico decimal se remonta al siglo XVIII con la ***Revolución Francesa***, y con ello, los primeros inicios del **Sistema Internacional de Unidades (SI)**. Esto surge con la finalidad de reemplazar los sistemas locales naturales de medidas históricas y lograr mediciones cada vez más precisas en el ámbito comercial y científico. Sin embargo fue hasta 1799 con la creación de los primeros prototipos del metro y del kilogramo, cuando se promovió la aplicación del sistema métrico para diferentes áreas de la ciencia y la tecnología. El *Bureau International des Poids et Mesures,* ubicado en París Francia (BIPM, 2025), señala al 20 de mayo de 1875 como una fecha histórica de la metrología. A través del tratado de la convención del metro se logra una formalización de la cooperación internacional, y se establecieron estándares de medición. Inicialmente, en esa época se tuvo la participación de diecisiete países miembros. En esta convención se estableció a la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), la cual sirve para coordinar a la metrología internacional, a la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), quien aprueba las resoluciones del sistema, y al Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) como el órgano técnico-científico que asesora a la CGPM donde surgen y se proponen definiciones, métodos, normas, etc.

El SI, por sus siglas en francés (*Système International d'Unités*), es el sistema de unidades más ampliamente utilizado a nivel mundial. Sirve para expresar magnitudes físicas. Fue formalmente establecido en 1960 mediante una resolución en la 11a reunión de la CGPM con el objetivo de unificar y estandarizar las mediciones a nivel global, facilitando así la comunicación científica, técnica y comercial entre países.

El SI lo conforman siete unidades (Fig. 1): (1) el metro (m) para la longitud, (2) el kilogramo (kg) para la masa, (3) el segundo (s) para el tiempo, (4) el amperio (A) para la corriente eléctrica, (5) el kelvin (K) para la temperatura,(6) el mol (mol) para la cantidad de sustancia y (7) la candela (cd) para la intensidad luminosa. A partir de estas unidades, se derivan unidades secundarias que permiten medir una gran variedad de fenómenos físicos. Así mismo, el SI proporciona un lenguaje común que permite realizar mediciones precisas, consistentes y comparables en centros de metrología de todo el mundo, contribuyendo así al avance del conocimiento científico y al desarrollo tecnológico global.

Fig. 1. Logo del SI. Adoptado del BIPM.
https://www.bipm.org/en/measurement-units/si-promotion

Una de las unidades del SI más arcaicas es el **kilogramo** de 1889 como un prototipo internacional del kilogramo (artefacto), hecho de platino-iridio. Sin embargo, esta unidad

ha evolucionado en el tiempo hasta definirse mediante constantes definitorias.

En este artículo se realiza un análisis documental (revisión técnica-histórica) del estudio del Sistema Internacional de Unidades, y cómo la unidad del kilogramo ha evolucionado en el tiempo y su introducción a México. La recopilación de información se llevó a cabo mediante una revisión exhaustiva de fuentes oficiales, particularmente de la página del Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), donde se consultaron las resoluciones emitidas por la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), los informes técnicos del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) y los documentos de los Comités Consultivos (CC) relacionados con la masa y las constantes fundamentales. De igual manera, se revisaron las publicaciones y comunicados del Centro Nacional de Metrología (CENAM) de México, los cuales proporcionan información relevante sobre la participación nacional en proyectos de comparación internacional, la trazabilidad de patrones de masa y los avances en la implementación de la redefinición del kilogramo basada en la constante de Planck.

Complementariamente, se realizó una búsqueda sistemática de artículos científicos en bases de datos indexadas como Scopus, Web of Science y ScienceDirect, empleando palabras clave relacionadas con “redefinición del kilogramo”, “Sistema Internacional de Unidades”, “constantes definitorias” y “metrología de masa”. Esta revisión permitió integrar diferentes perspectivas técnicas y científicas sobre los métodos de realización del kilogramo, las recomendaciones de los comités internacionales y los desafíos asociados a su diseminación práctica en los laboratorios nacionales. La combinación de fuentes institucionales y literatura científica especializada garantiza un marco documental sólido y actualizado para el análisis histórico y técnico del proceso de redefinición del kilogramo y su adopción en México.

El presente trabajo está organizado de la siguiente forma: la Sección 2 considera un marco teórico, en la Sección 3 se muestra un análisis del estado del arte, en la Sección 4 se mencionan los aspectos destacados, y por último en la Sección 5 se presentan las conclusiones y proyecciones para trabajos futuros.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1 Historia del Sistema Internacional de Unidades (SI).

El Sistema Métrico fue el primer sistema de medición que unifica y universaliza las medidas, en 1791 en la Academia de Ciencias en París es donde se declara su acto fundacional y está basado en unidades naturales. Sin embargo, este nuevo sistema desafió a la ciencia con la búsqueda de nuevas formas de trabajo para su realización. En respuesta a ello, en 1875 se crea la Convención del Metro que establece la homogeneidad mundial con las unidades de medida. Sin embargo, fue hasta 1960 mediante la resolución de la 11ª reunión de la CGPM, que la BIPM implementó el SI como un lenguaje básico para la ciencia, la tecnología, la industria y el comercio. Desde entonces, el SI se volvió un marco normativo mundial para las mediciones (Kovalevsky y Quinn, 2004).

A partir de la implementación del SI se comenzó a trabajar con la materialización de las unidades generando fechas importantes como las creaciones de los patrones de referencia y actos simbólicos que representan un cambio significativo en el marco normativo y que a continuación se enlistan:

- En 1967 se define al **segundo** en términos de la frecuencia de transición entre dos niveles hiperfinos del átomo de cesio-133.
- En 1983 se define al **metro** en términos de la longitud de onda de la luz emitida por un láser de helio-neón estabilizado.
- En 1889 se define **al kilogramo pa**trón en términos de la masa de un artefacto de platino-iridio y en 1999 se recomienda a los laboratorios nacionales perfeccionar los experimentos para vincular la unidad de masa con constantes atómicas o fundamentales en la nueva definición del kilogramo.
- En 2018 se redefine el Kelvin, el kilogramo, el ampere y el mol en términos de constantes físicas fundamentales.
- En 2019 entran en vigor nuevas redefiniciones del SI y se redefine la candela en términos de la eficacia luminosa de una fuente de luz radiante.

Estos acontecimientos son diseminados por los comités consultivos (CCs); quienes a su vez brindan las directrices de la realización práctica mediante métodos primarios que proporcionan mediciones trazables al SI (BIPM, 2025).

2.2 Unidades del SI

El SI tiene siete unidades, cada una se representa por una magnitud física fundamental. A continuación se muestra en la Tabla 1, la magnitud, la unidad que la representa y su símbolo.

Tabla 1. Unidades del SI.

Magnitud física	**Unidad**	**Símbolo**
Tiempo	segundo	s
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Corriente eléctrica	amperio	A
Temperatura termodinámica	kelvin	K
Cantidad de sustancia	mol	mol
Intensidad luminosa	candela	cd

Las unidades del SI se definen de manera que cada una sea independiente, lo que permite generar todas las demás unidades, conocidas como unidades derivadas, a través de

combinaciones algebraicas entre ellas. En la Tabla 2, se muestra la definición de las 7 unidades del SI.

Tabla 2. Definición de unidades del SI. Adoptado del BIPM, 2025.

Unidad	Definición derivada
segundo (s)	Es la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133.
metro (m)	Es la longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de 1/299 792 458 de segundo.
kilogramo (kg)	Se define tomando el valor numérico fijo de la constante de Planck h como 6,626 070 15 × 10^{-34} cuando se expresa en la unidad J s, que es igual a kg m² s–1, donde el metro y el segundo se definen en términos de c y ΔνCs.
amperio (A)	Es la corriente eléctrica correspondiente al flujo de cargas elementales 1/(1.602 176 634 x 10^{-19}) por segundo.
kelvin (K)	Es igual a la variación de temperatura termodinámica que da lugar a una variación de energía térmica kT de 1.380 649 × 10^{-23} J.
mol (mol)	Es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene 6.022 140 76 × 10^{23} entidades elementales especificadas.
candela (cd)	Es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia 540 × 1012 Hz y tiene una intensidad radiante en esa dirección de 1/683 W/sr.

2.3 El Sistema Internacional y sus constantes definitorias.

El SI es un sistema coherente de unidades, sin embargo, en años anteriores algunas unidades estaban definidas mediante constantes fundamentales de la naturaleza y otras mediante artefactos físicos. No obstante, el avance científico fue evolucionando y en el 2018 se redefinieron 4 de las unidades del sistema, generando un enfoque que asegura que las definiciones de las unidades sean universales, estables a largo plazo y libres de dependencia de artefactos físicos, lo cual mejora la coherencia, trazabilidad y reproducibilidad de las mediciones en la ciencia y tecnología. Este cambio entró en vigor el 20 de mayo del 2019, teniendo un conjunto de siete constantes definitorias y considerando como base las siete unidades básicas anteriores. El sistema completo de unidades puede derivarse de los valores fijos de estas constantes definitorias, expresadas en las unidades del SI, lo cual permite definir cualquier magnitud física. Las siete constantes definitorias son la característica más fundamental de la definición de todo el sistema de unidades. No existe una relación de uno a uno entre las siete constantes definitorias y las siete unidades básicas, ya que muchas de las unidades básicas recurren a más de una de las constantes definitorias.

Las definiciones de las unidades del SI representan el nivel de referencia más elevado para la trazabilidad de las mediciones al SI. Las definiciones que a continuación se muestran especifican el valor numérico exacto de cada constante cuando su valor se expresa en la unidad SI correspondiente. Al fijar el valor numérico exacto, se define la unidad, ya que el producto del valor numérico y la unidad debe ser igual al valor de la constante, que se postula invariable.

Las siete constantes se eligen de forma que cualquier unidad del SI pueda escribirse mediante una constante definitoria o mediante productos o cocientes de constantes definitorias.

1. *La frecuencia de transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio-133, Δv Cs, es de 9 192 631 770 Hz.*
2. *La velocidad de la luz en el vacío, c, es de 299 792 458 m/s.*
3. *La constante de Planck, h, es 6.626 070 15 × 10^{-34} J s.*
4. *La carga elemental, e, es 1.602 176 634 × 10^{-19} C.*
5. *La constante de Boltzmann, k, es 1.380 649 × 10^{-23} J/K.*
6. *La constante de Avogadro, NA, es 6.022 140 76 × 10^{23} mol^{-1}.*
7. *La eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia 540 × 10^{12} Hz, Kcd, es 683 lm/W.*

Los valores numéricos de las siete constantes definitorias no tienen incertidumbre.

2.4 Realización práctica de las unidades del SI.

El CIPM como el órgano técnico-científico establece agendas de trabajo a los comités consultivos; existen 10 CCs de las unidades y algunos de apoyo para el continuo desarrollo de las unidades del SI.

A continuación, se enlistan estos CCs con sus fechas de creación y sus últimas modificaciones:

1. El Comité Consultivo de Electricidad y Magnetismo *(CCEM, 1927-1997)*.
2. El Comité Consultivo de Fotometría y Radiometría *(CCPR, 1933-1971)*.
3. El Comité Consultivo de Termometría *(CCT, 1937)*.
4. El Comité Consultivo de Longitud *(CCL, 1952-1997)*.
5. El Comité Consultivo de Tiempo y Frecuencia *(CCTF, 1956-1997)*.
6. El Comité Consultivo de Radiaciones Ionizantes *(CCRI, 1958-1997)*.
7. El Comité Consultivo de Unidades *(CCU, 1954-1964)*.
8. El Comité Consultivo de Masas y Magnitudes Relacionadas *(CCM, 1980)*.
9. El Comité Consultivo de Cantidad de Sustancia: Metrología en Química y Biología *(CCQM, 1993)*.

10. El Comité Consultivo de Acústica, Ultrasonidos y Vibraciones *(CCAUV, 1999).*

Los CCs proporcionan el marco regulatorio para establecer la equivalencia de las realizaciones con la finalidad de establecer métodos reconocidos y aceptables. A continuación se mencionan los principales métodos con los que los CC's actualmente cuentan:

1. El CCEM (CCEM, 2019), indica en la práctica, que el amperio A se puede obtener utilizando:
   a) la ley de Ohm, la relación unitaria A = V/Ω, y utilizando realizaciones prácticas de las unidades derivadas del SI, el voltio V y el ohmio Ω, basadas en los efectos Josephson y Quantum; o
   b) utilizando un transporte de un solo electrón (SET) o dispositivo similar, la relación unitaria A = C/s, el valor de "*e"* dado en la definición del amperio y una realización práctica de la unidad base del SI, el segundo s; o
   c) utilizando la relación I = C·dU/dt, la relación unitaria A = F·V/s, y realizaciones prácticas de las unidades derivadas del SI, el voltio V y el faradio F, y de la unidad base del SI, el segundo s.

2. El CCPR, a través de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) ha definido un conjunto de funciones de ponderación espectral o espectros de acción, denominadas funciones de eficiencia luminosa espectral, que describen la sensibilidad espectral relativa del ojo humano promedio para condiciones visuales específicas. Estas funciones se definen como función de la longitud de onda en aire estándar (aire seco a 15 ºC y 101 325 Pa, que contiene 0,045 % en volumen de dióxido de carbono) y normalizadas a la unidad en su valor máximo. La constante, K_{cd}, junto con las funciones de eficiencia luminosa espectral, relaciona cantidades fotométricas y cantidades radiométricas para establecer un sistema metrológicamente consistente. Es importante mencionar que, en el 2007, el CIPM concluyó un convenio con la CIE, en el que las dos organizaciones reconocen que:
   a) El CIPM es responsable de la definición de las unidades fotométricas en el SI y,
   b) El CIE es responsable de la estandarización de las funciones de eficiencia luminosa espectral del ojo humano (CCPR, 2021).

3. El CCT, menciona que si bien la definición de 2018 del kelvin en términos de la constante de Boltzmann no tiene un impacto inmediato sobre el estado del ITS-90 y el PLTS-2000, existen importantes beneficios, particularmente para mediciones de temperatura por debajo de 20 K y por encima de 1 300 K, donde los termómetros primarios pueden ofrecer una incertidumbre termodinámica más baja que la actualmente disponible con el ITS-90 y el PLTS-2000. Es por ello que, en el futuro, a medida que los métodos primarios evolucionen, se espera que, en el desarrollo de los métodos primarios se obtengan incertidumbres cada vez más bajas. Así mismo, se espera que los termómetros puedan utilizarse más ampliamente y puedan reemplazar gradualmente al ITS-90 y al PLTS-2000, como la base de la medición de la temperatura (CCT, 2019).

4. El CCL, nos dice que la realización práctica se puede realizar mediante uno de los siguientes métodos principales:
   a) por medición directa del tiempo de viaje de la luz, y
   b) por medición indirecta del tiempo de viaje de la luz (CCL, 2019).

5. El CCTF, mediante relojes atómicos, refiere a una situación idealizada que puede alcanzarse en la práctica sólo con cierta incertidumbre. En este sentido, la definición del segundo debe entenderse referida a átomos libres de cualquier perturbación, en reposo y en ausencia de campos eléctricos y magnéticos (CCTF, 2019).

6. El CCM actualmente presenta dos métodos primarios independientes, los cuales son capaces de realizar la definición del kilogramo con incertidumbres relativas relativamente pequeñas dentro de unas pocas partes en 10^8.
   a) El primero de ellos se basa en determinar la masa desconocida mediante una balanza electromecánica especialmente diseñada para tal fin.
   b) El segundo método compara la masa desconocida con la masa de un solo átomo de un isótopo específico contando el número de átomos en un cristal, donde la masa del átomo es bien conocida en términos de *h, c,* y $\Delta\nu_{Cs}$ (CCM, 2021).

7. El CCQM, hoy en día, la determinación más precisa del mol resulta de un experimento que condujo a la determinación de la constante de Avogadro. Este experimento se llevó a cabo en el marco de la Coordinación Internacional de Avogadro y fue fundamental para determinar los mejores valores experimentales de las constantes de Avogadro y Planck antes de fijar sus valores numéricos. Se trató de determinar el número de átomos de ^{28}Si (N) en un monocristal de Si, enriquecido en ^{28}Si, mediante mediciones volumétricas e interferométricas de rayos X (CCQM, 2025).

2.5 Adopción del SI en México.

El uso del SI ha sido un hecho determinante en el desarrollo científico, tecnológico y comercial del mundo. En el caso de México, la adopción del sistema métrico decimal (precursor del actual Sistema Internacional de Unidades) generó la búsqueda de uniformidad y modernización siendo el 20 de febrero de 1856 donde Don Ignacio Comonfort fomento el uso del Sistema Métrico Decimal, sin embargo fue hasta el 27 de octubre de 1865 que de manera oficial se promulga el decreto

del uso obligatorio del Sistema Métrico Decimal (CENAM, 2008).

México se convirtió en uno de los primeros países de América en adoptar oficialmente el sistema métrico decimal, siendo notificado el 4 de agosto de 1890 a Gustavo Baz por Carlos Ibañez (primer presidente de CIPM) el ingreso al Tratado del Metro, consolidando su compromiso con la metrología internacional.

Desde entonces, el país comenzó su travesía en el mundo de la metrología. De manera cronológica, dos actos simbólicos que marcan la historia en nuestro país son la adquisición de los primeros patrones de referencias:

1. La llegada del patrón internacional del kilogramo # 21(20 de agosto de 1892), y
2. la llegada del patrón internacional del metro # 25 (16 de abril de 1895).

Ambos artefactos fueron establecidos hasta el 06 de junio de 1905 por Porfirio Diaz como patrones de referencia en el país para su uso en los artículos 4° y 5° de la Constitución (CENAM, 2008).

Por otra parte, México tiene otros hechos relevantes como:

- Su primera asistencia a la reunión de la CGPM fue en la semana del 4 al 14 de septiembre de 1895 representado por el Ingeniero Francisco Garibay.
- El Dr. Manuel Sandoval Vallarta formó parte del CIPM desde 1960 hasta 1977, así como el Dr. Hector O. Nava Jaimes en el 2008,

Con esto se demuestra, que México se encuentra desarrollando un papel en materia de metrología primaria.

Por otra parte, se trabajó en el marco normativo con estándares aplicables en materia de metrología siendo la norma oficial NOM-008-SCFI-1986 titulada *"Sistema de unidades de medida"* y posterior a ello un sin fin de normativa aplicables al SI.

Otro evento virtuoso fue la creación del Centro Nacional de Metrología (CENAM) en el año 1993. El centro cuenta con una infraestructura sólida, es un organismo descentralizado del gobierno federal con personalidad jurídica y patrimonio propio para el desarrollo en del SI; en ese mismo año de su creación se le fueron entregados los prototipos internacionales de referencia del metro y del kilogramo para su resguardo y conservación,

2.6 El kilogramo en México.

La historia del kilogramo en México es un capítulo fundamental de la metrología nacional, ya que fue el primer artefacto físico que tuvo en materia de metrología. Este artefacto fue concebido con su llegada del prototipo internacional # 21 y con una referencia muy importante siendo su certificado expedido el 28 de septiembre de 1889 y con un valor de 1 kg ± 63 µg; su costo fue de 3 150 francos más 200 francos más por sus accesorios. La referencia de esta unidad de masa es de forma cilíndrica de un diámetro igual que su altura, 39 mm hecho de 90% de platino y 10% iridio, con un acabado de pulido a espejo. Este artefacto fue legalmente establecido como el Patrón Nacional de Masa mediante la Ley sobre Pesas y Medidas de 1905. Este patrón físico se convirtió en la referencia única para todas las mediciones de masa en el territorio nacional.

Aunque el Centro Nacional de Metrología (CENAM) fue fundado en 1993, es la institución que hoy en día garantiza la trazabilidad y la exactitud de todas las mediciones de masa en México. El CENAM resguarda el Patrón Nacional y es la entidad encargada de su evaluación, sin embargo fue hasta el 31 de marzo de 1996 que se obtuvo por primera vez con una serie de mediciones del prototipo # 21 el valor de la masa de acero inoxidable, siendo el punto de partida de la escala nacional de masa (CENAM, 2008).

Actualmente con la redefinición del kilogramo de 2019 donde se vinculó a una constante fundamental de la naturaleza: la constante de Planck (h), se han establecido dos métodos primarios recomendados por el BIPM para su realización práctica asegurando: la realización mediante la comparación de la potencia eléctrica con la potencia mecánica, y la realización mediante el método de densidad cristalina por rayos X. El primero de ellos se basa en determinar la masa desconocida utilizando una balanza electromecánica especialmente diseñada para tal fin. El segundo método compara la masa desconocida con la masa de un solo átomo de un isótopo específico contando el número de átomos en un cristal, donde la masa del átomo es bien conocida en términos de h, c y $\Delta\nu$ Cs.

3. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

Se trata de presentar una visión histórica y técnica lo mejor estructurada posible sobre la evolución y el estado actual del Sistema Internacional de Unidades (SI), así como su marco normativo global para las mediciones.

El estado del arte en la metrología está destacado por la redefinición de las unidades en 2019, que consolidó la transición de la metrología clásica (artefactos físicos) a la metrología cuántica (basada en constantes fundamentales) como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Enfoque de la metrología clásica a la actual del kilogramo.

Período	Enfoque	Kilogramo
1791-2019	Sistema Métrico/ SI Clásico	Definido por un artefacto físico (el Prototipo Internacional del kilogramo)

2019-actual	SI Redefinido	Definido al fijar el valor numérico de la Constante de Planck (h).

Este cambio, es el aspecto más relevante, ya que proporciona definiciones que son universales, estables a largo plazo y libres de la incertidumbre asociada a la inestabilidad de los patrones físicos. La información destaca que, al fijar el valor de siete constantes definitorias, se asegura la coherencia, trazabilidad y reproducibilidad de todas las unidades del SI.

Actualmente la realización práctica tiene la capacidad de realizar (materializar) las unidades en cualquier laboratorio del mundo con la máxima exactitud posible. De igual manera, los CCs del BIPM son los encargados de establecer las directrices para esta realización práctica, sin embargo es una lista enunciativa más no limitativa para realizar las unidades.

Para la masa (kilogramo), se describen los dos métodos primarios de realización de vanguardia, ambos ligando la unidad a la constante de Planck (h). Para otras unidades, se subraya la dependencia de fenómenos cuánticos y constantes fundamentales:

- Amperio (A): Trazabilidad a las realizaciones prácticas del voltio (V) y el ohmio (Ω) basadas en los efectos Josephson y Quantum Hall.
- Mol (mol): Trazabilidad al experimento de determinación de la Constante de Avogadro (NA) realizado mediante mediciones volumétricas e interferométricas de rayos X en monocristales de 28Si.

La metrología en México se caracteriza por su temprana y sostenida participación en el SI, aunque su infraestructura de realización primaria es complementada por la colaboración global.

La Tabla 4 muestra los aspectos más importantes de la metrología en México.

Tabla 4. Antecedentes importantes de la metrología en México.

Antecedente	Fecha	Significado en el Estado del Arte
Adopción Oficial	1890	México fue pionero en América al ingresar al Tratado del Metro, sentando las bases legales y políticas.
Llegada del k21	1892	Establecimiento del Patrón Nacional de Masa (Prototipo # 21) como referencia física.
Fundación del CENAM	1993	Creación de una infraestructura sólida centralizada para el desarrollo, resguardo y diseminación del SI en el país.
Diseminación de Masa	1996	Obtención del primer valor de masa de acero inoxidable, marcando el inicio formal de la escala nacional de masa trazable.
Participación Activa	1895, 1960-1977, 2008	Presencia constante de representantes mexicanos en la CGPM y el CIPM, asegurando que México esté al tanto de las últimas directrices metrológicas.

El CENAM es una institución muy importante para México, ya que asegura la trazabilidad de las mediciones a patrones nacionales. Si bien en México no se ha dado a conocer la operación de un artefacto para la nueva realización primaria, sí mantiene su Patrón Nacional (k21) y participa en las comparaciones internacionales para que su valor pueda ser trazable al valor fijo de la constante de Planck, asegurando la uniformidad y exactitud requerida por el estado del arte global.

4. ASPECTOS DESTACADOS

El aspecto más relevante de la metrología moderna es el cambio de enfoque de los patrones materiales a los principios universales de la física.

El Sistema Métrico se fundó en París en 1791 para unificar las medidas, lo que llevó a la creación de la Convención del Metro en 1875 para establecer la homogeneidad global. El Sistema Internacional de Unidades (SI) fue formalmente implementado en 1960 por el BIPM.

La ciencia evolucionó las definiciones de las unidades para basarlas en constantes físicas fundamentales en lugar de artefactos.

- Kilogramo: La unidad de masa dejó de ser un artefacto de platino-iridio a definirse al fijar el valor numérico de la Constante de Planck (h).
- El kelvin, amperio, y mol también fueron redefinidos en términos de constantes fundamentales.

Los comités consultivos del BIPM establecen los métodos para "realizar" las siete unidades del SI.

El SI actualmente está completamente definido por un conjunto de siete constantes de la naturaleza, cuyos valores numéricos son exactos y no tienen incertidumbre.

5. CONCLUSIONES Y PROYECCIONES FUTURAS.

La conclusión fundamental en la historia de SI es la eliminación de los artefactos físicos como base de las unidades de medida, culminando con la redefinición de 2019.

El SI, adoptado formalmente en 1960, se redefinió en 2019 para basarse exclusivamente en siete constantes físicas fundamentales de la naturaleza.

Estas siete constantes definitorias tienen asignado un valor numérico fijo y exacto. Al fijar el valor de la constante, se define la unidad, lo que garantiza que las unidades sean universales, estables a largo plazo. No existe una relación uno a uno de las unidades base del SI con las nuevas constantes definitorias.

Este cambio representa la consecución del ideal de tener unidades de medida invariantes en el tiempo y en el espacio.

Los Comités Consultivos del BIPM establecen los métodos primarios para la realización práctica de las unidades.

México ha mostrado un compromiso continuo con la metrología internacional desde que adoptó oficialmente el sistema métrico decimal en 1865 y se adhirió al Tratado de la convención del Metro en 1890.

REFERENCES

Alder, K. (2002). The Metric System: A History. W. W. Norton & Company.

Barco R., H. & Rojas C., E. (2002). Cálculo de la constante de Planck a través del efecto fotoeléctrico. Revista Departamento de Ciencias, mayo 2002.

Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). (2019, versión 3.02 en 2025) The International System of Units (SI). 9th edition. Sèvres: BIPM.

Centro Nacional de Metrología (CENAM). (2008) Prototipos Nacionales del Sistema Métrico Decimal. Querétaro: CENAM.

Consultative Committee for Amount of Substance - Metrology in Chemistry and Biology (CCQM). (2025). Mise en pratique for the definition of the mole in the SI (SI Brochure - 9th edition, Appendix 2, Versión 2).

Consultative Committee for Electricity and Magnetism (CCEM). (2019). Mise en pratique for the definition of the ampere and other electric units in the SI (SI Brochure - 9th edition, Appendix 2).

Consultative Committee for Length (CCL). (2019). Mise en pratique for the definition of the metre in the SI (SI Brochure - 9th edition, Appendix 2).

Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM). (2021). Mise en pratique for the definition of the kilogram in the SI (SI Brochure - 9th edition, Appendix 2).

Consultative Committee for Photometry and Radiometry (CCPR). (2021). Mise en pratique for the definition of the candela and associated derived units for photometric and radiometric quantities in the SI (SI Brochure - 9th edition, Appendix 2 v1.02).

Consultative Committee for Thermometry (CCT). (2019). Mise en pratique for the definition of the kelvin in the SI (SI Brochure - 9th edition, Appendix 2).

Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF). (2019). Mise en pratique for the definition of the second in the SI (SI Brochure - 9th edition, Appendix 2).

Davis, R. S. (2011). The role of the international prototype of the kilogram after redefinition of the International System of Units. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.

Davis, R. S., Barat, P. & Stock, M. (2016). A brief history of the unit of mass: Continuity of successive definitions of the kilogram. Metrologia, 53(5), A12- A18.

Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). (2012). International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM) (JCGM 200:2012, 3ª ed.). Sèvres: BIPM.

Kovalevsky, J. y Quinn, T.J. (2004) 'The international system of units (SI)', Comptes Rendus Physique, 5(8), pp. 799–811.

López Romero, J. M. & Lazos Martínez, R. J. (2011). Constantes fundamentales: la última frontera para el Sistema Internacional de Unidades. Revista Mexicana de Física, 57(5).

Machin, G. (2013) 'Essential Measurement', Measurement and Control, 46(3), pp. 90–96.

Moreau, H. (1953). The genesis of the metric system and the work of the International Bureau of Weights and Measures. Journal of Chemical Education, 30(1).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). (2019). PTB Mitteilungen: Edición Especial: Experimentos para el nuevo SI, el Sistema Internacional de Unidades (2ª ed.). Braunschweig y Berlín: PTB.

Richard, P., Fang, H. & Davis, R. (2016). Foundation for the redefinition of the kilogram. Metrologia.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Hybrid Architecture for Visual Pattern Detection in an Inspection System for the Filling of Cider Bottles

S. E. Martinez Alvarez*, M. A, Pérez Romero, A. J. Piña Díaz*****

**Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco, Departamento de Ingeniería en Control y Automatización, Ciudad de México,México (e-mail: smartineza1602@alumno.ipn.mx)*

*** Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco, Departamento de Ingeniería en Control y Automatización, Ciudad de México,México (e-mail: maperezro@.ipn.mx)*

**** Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco, Departamento de Ingeniería en Control y Automatización, Ciudad de México,México (e-mail: apinad@.ipn.mx)*

Abstract: Nowadays, systems based on pattern detection are essential for improving efficiency and quality in industrial processes, offering a viable alternative for micro-enterprises in transition towards automated production models under the principles of Industry 4.0. This work presents the design and implementation of an automated visual inspection system for the detection of the fill level in cider bottles, aimed at small producers in the food sector. The proposal combines low-cost technologies, such as webcams, graphic development platforms (LabVIEW) and Arduino microcontrollers, with visual pattern recognition algorithms to identify bottles that do not comply with the established filling parameters. The system uses real-time image processing to analyze the liquid level using edge detection techniques, comparing it to pre-defined references. Non-compliant bottles are automatically deflected by a digitally controlled servomotor. Experimental results show an accuracy of 91.6 % in bottle classification, an average response time of 1.86 seconds and a 78 % reduction in inspection times compared to the manual process.

Keywords: Pattern Recognition, Machine Vision, Industrial Automation, Fill Level Inspection, LabVIEW.

1. INTRODUCTION

Quality control in industrial processes is an essential practice to guarantee uniformity, safety and end consumer satisfaction. In the food industry, and particularly in the beverage bottling sector, ensuring proper filling of each container not only responds to regulatory criteria, but also to the consumer's perception of the value of the product (Aadil et al., 2019). The presence of overfilled or underfilled bottles can lead to economic losses, commercial claims or even sanitary sanctions, depending on the regulatory context.

Historically, this type of inspection has been performed by direct observation by operators, which implies a strong dependence on human attention, with a high probability of error due to fatigue, subjective variability or non-standardized lighting conditions (Groover, 2019). The automation of this task by means of artificial vision systems represents an effective, scalable solution aligned with the principles of Industry 4.0 (Hornberg, 2016).

Automated visual inspection systems have been successfully applied in surface defect detection, dimensional control and label verification, among other processes (Singh & Desai, 2023). However, their adoption in low-volume production lines, such as in the case of micro-enterprises or artisanal beverage producers, has been limited due to high implementation costs and technical complexity.

In this context, programming tools such as LabVIEW, widely used in industrial automation, offer a viable alternative for the development of accessible control and inspection interfaces, as they are easily integrated with vision sensors and physical control systems such as Arduino or servo motors (Win et al., 2018).

For artisanal cider producers, their process is usually made up of the following stages: maceration, pressing, clarification, fermentation, storage, bottling and packaging. The main problem in the process lies in the stage of checking the fill level after bottling. This task is carried out visually by an operator, who, based on his judgement, determines whether or not the bottle meets the required level (Mangas Alonso, 2017).

This method can cause delays in the capping and packaging process. In addition, prolonged exposure of the product to air can negatively affect the taste and quality of the cider due to chemical alterations. It was also observed that the same personnel in charge of the inspection is the one who manually refills the non-compliant bottles, which contravenes the NOM-002-SCFI-2011 (Secretaría de Economía, 2011), NOM-142-

SSA1/SCFI-2014 (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2017b), NMX-EE-032-1983 (Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S.C., 2017a) and NMX-V-011-NORMEX-2013 (Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S.C., 2017b) standards, which prohibit the recycling of the product once it has been bottled.

The use of high-resolution cameras, digital processing algorithms, and machine learning techniques has enabled the development of more accurate and robust systems for quality control in production lines. Accurate estimation of liquid levels inside containers has been addressed through various technological approaches. Some developments have focused on the use of inertial sensors and cameras to determine the remaining volume, such as the Playful Bottle system, which combines an accelerometer and a camera in a mobile device to track fluid intake and generate automatic reminders (Chiu et al., 2009). According to Musić et al. (2023), image-based sensors allow continuous monitoring of liquid levels in small bottles, showing great potential for artisanal or small-scale bottling applications. Complementarily, Wang et al. (2023) implemented an integrated machine vision inspection system capable of detecting multiple defects in beverage containers, demonstrating that the combination of controlled lighting and automated analysis significantly reduces classification errors.

For their part, Farhangi et al. (2024) emphasise the applicability of computer vision in detecting imperfections in liquid bottles, validating the efficiency of these systems in industrial environments where speed and accuracy are critical. These advances confirm that the integration of low-cost hardware, such as industrial cameras or open-architecture microcontrollers, together with edge analysis and pattern recognition algorithms, is a viable and scalable alternative for inspection processes

This work presents the development of an automated visual inspection system aimed at monitoring the fill level in cider bottles. Through the recognition of visual patterns, the aim is to detect those that do not comply with the established standards. The proposed system uses a low-cost camera, an image processing algorithm developed in LabVIEW, and an ejection mechanism based on a programmed servomotor. This presents a functional and economically viable solution for small producers who wish to improve their quality standards through accessible and adaptable tools.

2. MATERIALS AND METHODS

The proposed solution proposes an automated inspection system using artificial vision, capable of identifying cider bottles whose fill level does not comply with the parameters established by a predefined reference. Two container sizes are considered for evaluation, one of 325 ml and the second of 500 ml. For both bottles, a tolerance limit of ±10 ml is set to identify whether it will be considered as an acceptable level and pass inspection (Fig.1). This operating margin value was defined based on the criteria of NOM-002-SCFI-2011 (Secretaría de Economía, 2012), which allows a variation of up to ±3 % from the nominal volume for contents of 300 to 500 ml. The rounded range of ±10 ml is consistent with the maximum permissible value for 325 ml bottles, ensuring that the system meets the acceptable accuracy requirements for bottled product inspection.

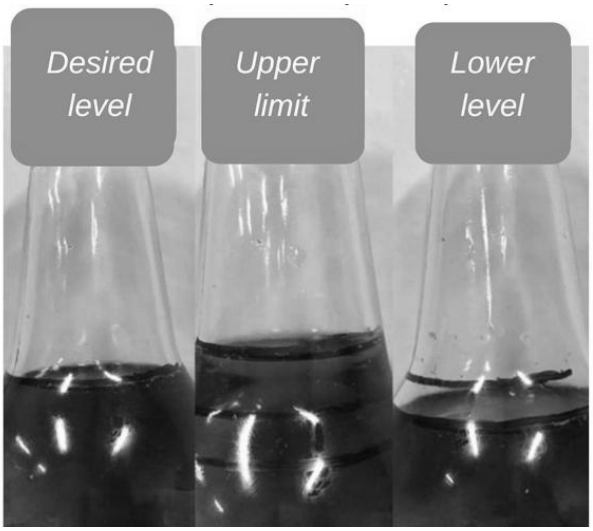


Figure 1 Tolerance for 325 ml bottle filling.

Figure 2 shows a general schematic of the operation of the proposed vision system. It is composed of three functional blocks: image acquisition, processing and classification, and mechanical actuation.

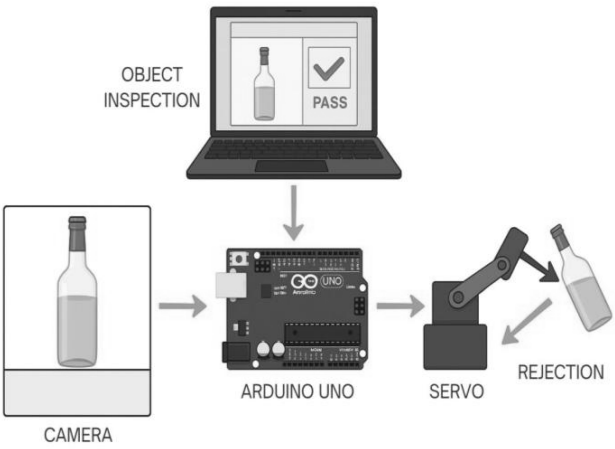


Figure 2 General architecture of the vision inspection system.

This inspection system is complemented by an automated production line, which consists of a main conveyor belt on which the empty bottles are placed, and the bottles are inspected to ensure that they are in the correct position for filling. After the filling stage is where the level inspection system is integrated, which consists of a camera that will be responsible for capturing the image of the bottles and by means of a programming algorithm will determine whether the current bottle has the required level to proceed to the capping stage, diverting those that do not meet the condition to an auxiliary conveyor belt (Figure 3).

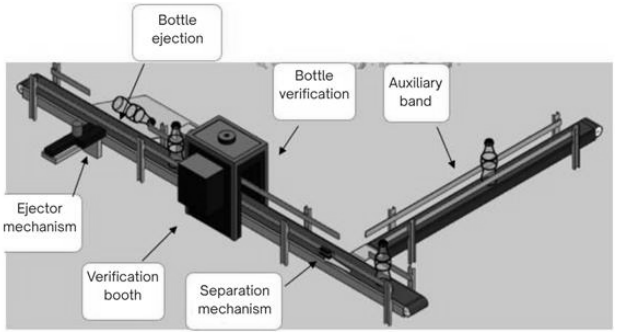


Figure 3 CAD model of the automated filling and level inspection system.

Figure 4 shows the simplified process in a flow chart.

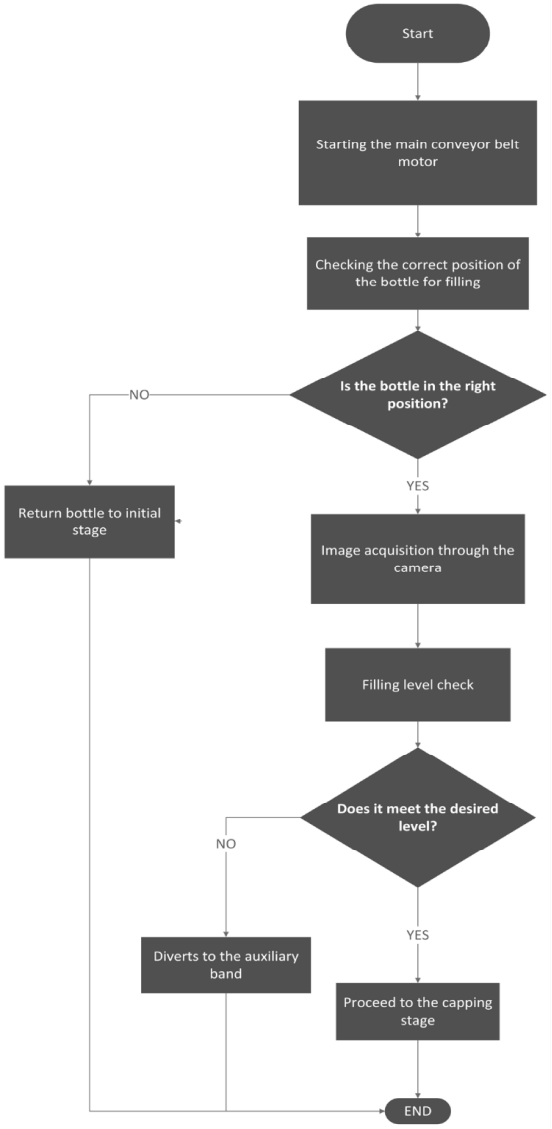


Figure 4 Process flow diagram.

For the image acquisition stage, a webcam with an Extended Graphics Array (XGA) resolution of 1024x768 pixels is used, selected for its low cost and ease of integration with software platforms. This camera is mounted on a fixed structure and oriented towards the top of the bottles, so that it will capture a clear front view of the liquid level (Figure 5.a). This structure is located inside a cabin of dimensions: 36 x 15 x 25 cm, useful to keep the illumination level controlled during the whole image acquisition process (Figure 5.b).

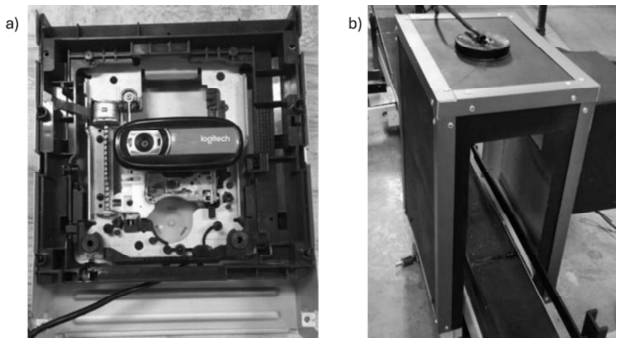


Figure 5 a) Mechanism for image acquisition, b) Cabin for level inspection.

To determine the required luminous flux around interest in the booth, the formula was used:

$$E = \frac{\theta_e}{S} \quad (1)$$

Where:
E = Required illumination level (lux).
θ_e= Luminous flux emitted by the lamp (lumens).
S = Area or surface to be illuminated (m^2).
Considering an inspection area of 441.15 cm^2, and a required illumination level of 500 lux (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2017a), the need for a lamp with 22.06 lumens is obtained. For this purpose, an LED light with a power of 3 W is implemented.
The visual inspection system was developed in the LabVIEW Vision Assistant environment, using an edge detection algorithm to accurately identify the liquid level inside the bottles and classify the product according to established standards. Through this software, a graphical interface was designed capable of capturing images in real time and applying a series of filters and digital analysis techniques.
The image analysis process begins with capturing a photograph of the container under controlled lighting conditions. The image undergoes a series of pre-processing steps, including conversion to greyscale to simplify analysis, application of a 2-pixel radius Gaussian filter to reduce optical noise caused by glass reflections or surface variations, and histogram equalisation to improve the contrast between the liquid and the background. Subsequently, the Sobel operator is used as the main edge detection technique, due to its balance between sensitivity and stability in industrial vision environments. The binarisation threshold parameter was determined experimentally in a range of 0.25 to 0.35 on the intensity scale, optimising the segmentation of the liquid edge under different lighting levels. To refine these values, 30 test images with different fill volumes were analysed, seeking to minimise classification errors and false positives in the identification of the meniscus.

From this analysis, the height of the visible liquid level is calculated and compared to a reference value. If the fill level is outside the tolerance range, either too high or too low, the bottle is classified as non-compliant.

The first step to achieve image processing is to link the microcontroller to the user interface with the LabVIEW Interface for Arduino program `LIFA_BASE`.

In this programming environment there is a *Vision Acquisition* block that allows configuring the necessary operating conditions for image capture. The first configuration to be made is the selection of the camera to be used. Then, the type of image to be acquired is chosen, in this case continuous acquisition. Next, the quality of the image acquisition is defined; in this case, the quality of 1024 x 768 is selected and the image is verified (Figure 6).

Figure 6 Image verification.

This completes the configuration of the camera, in order to proceed to the next configuration stage.

With the use of the *Vision Assistant* block, which contains a series of functions that allow the creation of patterns, which is the core of this application. This task is carried out by means of edge detection, within the block is the *Find Straight Edge* tool, which identifies an edge in a selected area, for which both lower and upper-level tolerances are defined, this being the level range that the programmed will detect as acceptable (Figure 7).

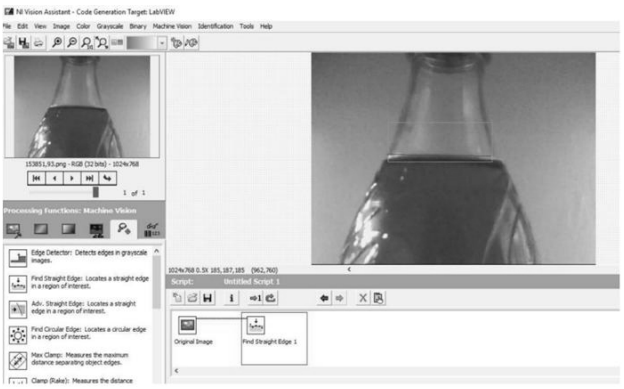


Figure 7 Start of edge detection.

Next, the selected area is defined, and the edge of the level is detected (Figure 8).

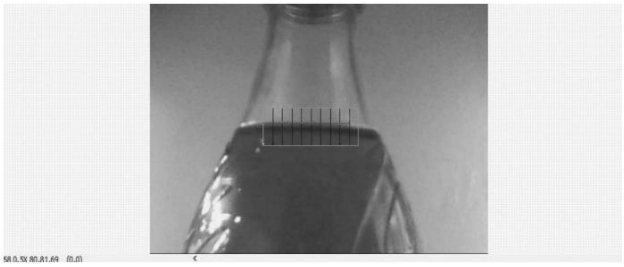


Figure 8 Selection of area of interest.

Finally, the 'Straight Edge' indicator is selected, and the wizard is finished. With this, the test is performed in the program (Figure 9) to verify the detection of the full bottle.

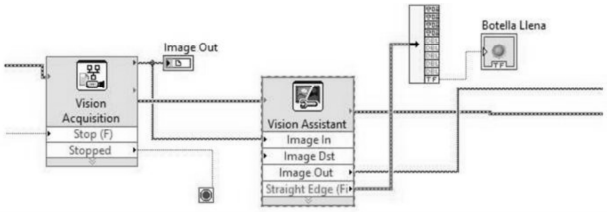


Figure 9 Bottle level identification

Once the decision is made, the system sends a digital signal to an Arduino board, connected via USB serial communication to the computer. This board controls an SG90 servomotor, which is responsible for driving a small lever that pushes the non-compliant bottles sideways into a separate container. The SG90 servomotor was chosen for its combination of low cost, commercial availability, and sufficient precision for position control applications in sorting systems. This servomotor provides a 180° rotation angle, 1.8 kgf/cm torque, and a fast response that is suitable for moving gates or selection mechanisms without requiring high-power power supplies. Furthermore, its compatibility with basic controllers and development platforms such as Arduino facilitates integration with the processing system developed in LabVIEW, reducing both implementation costs and the electronic complexity of the assembly. The activation cycle of the servomotor includes a 90-degree turn, ejection of the container, and return to the initial position in less than two seconds, ensuring a continuous and efficient flow. As for the power supply of the components, both the Arduino and the servo motor are powered by an external 5V, 2A supply, ensuring stable, jitter-free operation during the process.

The interface has a display window where the bottles can be monitored at the time of inspection, it also has two virtual buttons, start and stop. These, together with the physical buttons, allow the system to be operated. It also contains visual indicators that show information of interest in the process, such as: full bottles and non-conforming bottles (Figure 10).

Figure 10 User interface.

3. TESTS AND RESULTS

To validate the system, a series of experimental tests were conducted using bottles of varying fill levels. The tests focused on three key aspects: the accuracy of bottle classification, the overall response time of the system, and the consistency in the performance of the ejection mechanism.

Thirty bottles of cider were prepared, evenly distributed into three categories: 10 with fill level below the minimum accepted threshold, 10 with exact fill level, and 10 with overfill. Each was individually processed through the system, recording system performance in terms of hits, misclassification errors, response time, and consistency of ejection mechanism performance.

The bottle is passed over the belt to corroborate level detection. In the first case, the bottle complies with the appropriate range and lights a full indicator light (Figure 11).

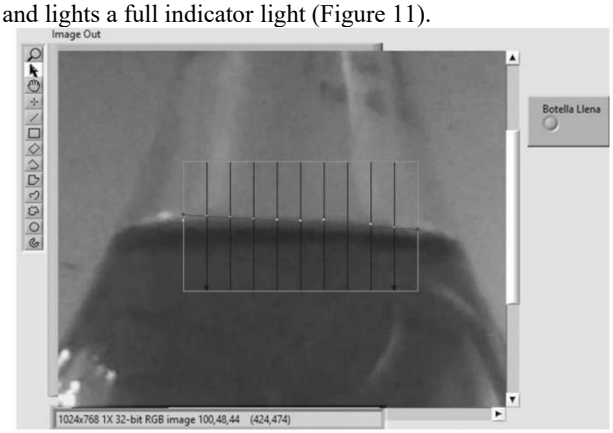


Figure 11 Cylinder level test.

For the second case, the cylinder does not comply with the level, so the indicator light does not illuminate (Figure 12).

Figure 12 Inadequate cylinder level test.

Once the liquid level inside the cylinder has been corroborated by means of pattern comparison, the mechanical actuator performs the separation by means of the servomotor.

The user interface is also tested to verify that it works as expected. The start of the conveyor belt is initiated by means of the virtual button, the indication that the belt is switched on and the image of the bottle in progress can be seen. Figure 13.a shows a case where the bottle does not comply with the required level, Figure 13.b exemplifies the operation of the interface for a level measurement that complies with the verification parameters.

a)

b)

Figure 13 Test of: a) non-compliant cylinder, b) compliant cylinder.

Figure 14 shows a scatter plot of the 355 ml bottles, classifying them as 1 for correct measurements and zero for errors in the machine vision system. The system managed to correctly identify 27 of the 30 bottles. The three misclassifications were borderline cases, where the fill level was very close to the lower range. This represents an accuracy of 90%, which is considered satisfactory for an initial stage of implementation.

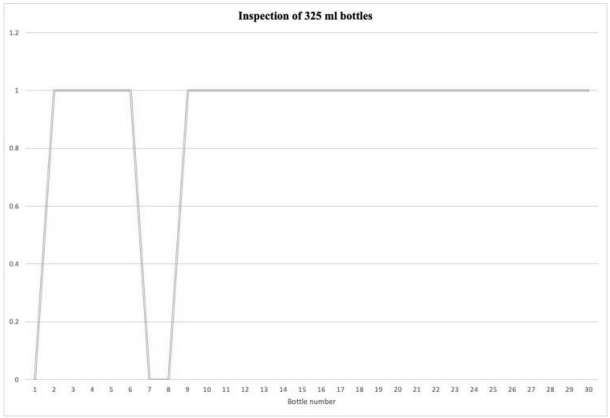


Figure 14 Fill level inspection graph for 355 ml bottles.

For the 500 ml bottles, the same tests were carried out on 30 bottles of cider, and Figure 15 shows the graph of the results obtained. In this case, the level of accuracy is 93.3%, also marked by the bottles filled to the edge of the lower limit established in the measurement standard.

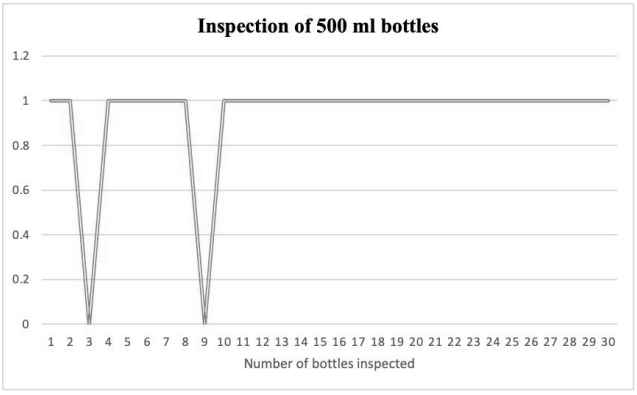


Figure 15 Graph of the 500 ml bottle fill level inspection.

As for the response time, from image capture to servomotor actuation, it was measured with a digital stopwatch, obtaining an average time of 1.86 seconds. This time includes the phases of image processing, acceptance or rejection decision and control signal sent to the actuator. The system responded in a stable manner, with no interruptions or communication failures during the tests. A standard deviation of less than 0.21 seconds was observed, indicating predictable operation and fast enough for low-speed production line applications.

Overall, the system showed robust functional behaviour, being able to operate with minimal user intervention and generating reliable results in a simulated production line environment. The graphical interface allows real-time monitoring of the status of each inspection and facilitates operator interaction, even without requiring advanced technical knowledge. These results reflect the potential of the system as a useful tool for automated quality control in small bottling processes by comparing sample visual patterns, with clear possibilities for future improvement and scaling up.

In general terms, Table 1 gives an overall summary of the samples obtained for both bottle capacity cases, 355 ml and 500 ml.

Table 1. Results of bottle classification by fill type.

Type of filling	Total number of samples	Correct classification	Incorrect classification	Accuracy by category
Low level	20	15	5	75%
Adequate level	20	20	0	100%
Overfilling	20	20	0	100%
Total	60	55	5	91.6%

4. CONCLUSIONS

The development and implementation of an automated visual inspection system for the detection of misfilled bottles proved to be a viable, economical and functional alternative for small production lines in the beverage industry. Using accessible tools such as a webcam, a visual development platform such as LabVIEW, and low-cost electronic components such as Arduino and servo motors, it was possible to design a system that integrates image capture, data analysis and physical rejection action in a controlled test environment.

The system achieved 91.6% accuracy in bottle classification, an average response time of 1.86 seconds and reliable mechanical performance in all tests performed. These results suggest that, under controlled lighting conditions and with a well-defined operating environment, it is possible to achieve satisfactory results with affordable resources, which represents a considerable advantage for adoption in micro-industries or educational contexts.

In terms of error analysis, five misclassifications were identified in borderline situations. This highlights the sensitivity of the system to unfavorable optical conditions, such as reflections on the surface of the liquid or slight variations in the position of the bottle.

The errors are attributed to specular reflections and intense glare produced by direct lighting on the container and faults associated with irregularities in the liquid itself, such as bubbles or foam, which generated multiple horizontal lines. Under these conditions, the system selected an incorrect edge due to its higher contrast. The edge of the liquid is confused with reflections on the glass surface, causing fragmented or incomplete edge detection. This underscores the importance of a well-controlled lighting environment, as well as the possible need for more robust optical filters or image correction techniques, such as brightness compensation or the use of

supervised learning algorithms to recognise complex patterns. Therefore, it is recommended to apply temporary filtering or an average of lines detected in several consecutive frames, identifying as valid the edge with greater temporal stability and spatial continuity.

A comparative test between a manual system and the proposed machine vision system is necessary to quantify the benefits of such an implementation. Based on an analysis of a cider bottle level verification process, carried out by three people, who verify 1 bottle every 9 seconds on average, Table 2 shows the number of bottles that are inspected in a minute, hours and up to a month, just before the implementation of the proposal.

Table 2. Number of cylinders inspected prior to the proposal.

Time	Inspected bottles
60 seconds	7
60 minutes	420
12 hours	5040
1 month	126000

With the proposed system, the bottle inspection time is reduced to 2 seconds per bottle. Table 3 shows the number of bottles once the proposal is implemented.

Table 3. Number of cylinders inspected with the proposal.

Time	Inspected bottles
60 seconds	30
60 minutes	1800
12 hours	21600
1 month	540000

By comparing the data in Table 2 and Table 3, it can be determined that the time was reduced by 78%. This time can be better focused on performing tasks that benefit production.

REFERENCES

Aadil, R.M., Madni, G.M., Roobab, U., Rahman, U., and Zeng, X.A. (2019). Quality control in beverage production: An overview. In Alexandru Mihai Grumezescu and Alina Maria Holban (eds.), Quality Control in the Beverage Industry, pp. 1–38. Academic Press, USA.

Chiu, M.-C., Chang, S.-P., Chang, Y.-C., Chu, H.-H., Chen, C. C.-H., Hsiao, F.-H., & Ko, J.-C. (2009). Playful bottle: A mobile social persuasion system to motivate healthy water intake. In Proceedings of the 11th International Conference on Ubiquitous Computing, 185–194. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA.

Farhangi, O., Sheidaee, E., and Kisalaei, A. (2024). Machine vision for detecting defects in liquid bottles: An industrial application for food and packaging sector. Cloud Computing and Data Science, 5(2), 183-254.

Groover, P. (2019). Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. Pearson, USA.

Hornberg, A. (2016). Handbook of Machine Vision. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., USA.

Mangas Alonso, J.J. (2017). Guía práctica de elaboración de la sidra artesana, 25-26. Centro de Investigación Aplicada y Tecnología Agroalimentaria (CIATA), Consejería de Agricultura del Principado de Asturias, Asturias, España.

Musić, J., Stančić, I., Džaja, B., and Pekić, V. (2023). Image-based sensor for liquid level monitoring during bottling with application to craft and home-brewing. Sensors, 23(16), 7126.

Secretaría de Economía (2011). Norma Oficial Mexicana NOM-002-SCFI-2011, Productos preenvasados-Contenido neto-Tolerancias y métodos de verificación.

Secretaría del Trabajo y Previsión Social (2017a). Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo.

Secretaría del Trabajo y Previsión Social (2017b). Norma Oficial Mexicana NOM-142-SSA1/SCFI-2014, Bebidas alcohólicas. Especificaciones Sanitarias. Etiquetado sanitario y comercial.

Singh, S.A., and Desai, K.A. (2023). Automated surface defect detection framework using machine vision and convolutional neural networks. Journal of Intelligent Manufacturing, 34, 1995–2011.

Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S.C. (2017a). NMX-EE-032-1983. Envase y embalajes de vidrio para bebidas alcohólicas en general.

Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S.C. (2017b). NMX-V-011-NORMEX-2013. Bebidas alcohólicas fermentadas – Sidra natural – Sidra – Sidra gasificada – Denominación, etiquetado y especificaciones.

Wang, J., Kang, J., Li, F., and Zhang, A. (2023). Machine-vision-based integrated inspection system for beverage bottles with multiple defects. Journal of Physics: Conference Series, 2577, 012005.

Win, L.H., Soe, Y.Y., and Lwin, D.Y.Y. (2018). Results analysis of real-time edge detection techniques using LabView. International Journal of Science and Engineering Applications, 7, 203–207.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Dynamic Drone Mesh Networks for Scalable Quantum Key Distribution in Challenging Environments

Alan Daleth Hernandez Barreto*. Maria Fernanda Velasco Campos*. Karol Yenaro Morales Escobar*. Arturo Emmanuel Diaz Dominguez.**

** Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ciencias Básicas. Avenida Tecnológico #27, Colonia Plan de Ayala, 62780, Zacatepec de Hidalgo, Morelos. México. (e-mail: {L23090959, L23091061, L23090998}@zacatepec.tecnm.mx).*

***Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ciencias Básicas. Avenida Tecnológico #27, Colonia Plan de Ayala, 62780, Zacatepec de Hidalgo, Morelos. México. (e-mail: { arturo.dd@zacatepec.tecnm.mx}).*

Abstract: Providing secure and scalable cryptographic key distribution in dynamic, infrastructure-less environments remains a major challenge. This work investigates the feasibility and performance of dynamic drone-based mesh networks for Quantum Key Distribution (QKD). A detailed Python-based simulation model was developed, incorporating realistic quantum and classical communication channels, multiple drone mobility strategies, key management mechanisms (including revocation), and simulated adversarial conditions such as jamming and interception. The objectives were to model dynamic environments, evaluate key distribution efficiency, and analyze the influence of configuration and adversarial factors on key availability. Results show that adversarial attacks substantially reduce key availability, emphasizing the need for robust security and adaptive key management. Directed mobility strategies demonstrated improved distribution efficiency compared to random movement. Overall, the findings indicate that dynamic drone mesh networks hold strong potential for scalable QKD deployment in challenging, mobile environments, though performance and resilience strongly depend on network configuration, link quality, and mitigation strategies.

Keywords: Quantum Key Distribution, Drone Networks, Mesh Networks, Mobile Robots, Dynamic Environments, Network Simulation, Key Management, Network Security.

1. INTRODUCCIÓN

La Distribución de Claves Cuánticas (QKD) representa una de las aplicaciones de la información cuántica, al ofrecer un método para establecer claves secretas cuya seguridad se fundamenta en principios de la mecánica cuántica, haciéndola inmune a ataques criptoanalíticos futuros, incluso por computadoras cuánticas avanzadas [Lo, Curty & Tamaki, 2014; Xu, Ma, Zhang, Lo & Pan, 2020]. A pesar de los avances logrados en entornos controlados de laboratorio y en enlaces fijos (fibra óptica o espacio libre estático), la implementación de redes cuánticas globales o móviles robustas enfrenta desafíos prácticos sustanciales. Entre ellos se incluyen pérdidas inherentes al canal, errores de detectores, limitaciones de sincronización temporal y, de manera crucial, los efectos dinámicos del ruido ambiental, la orientación y las vibraciones en plataformas móviles [Diamanti, Lo, Qi & Yuan, 2016; Xue, Chen, Wang, Yin, Shi & Han, 2021].

El despliegue de soluciones QKD en entornos dinámicos y sin infraestructura, como zonas de desastre o escenarios militares, requiere arquitecturas que combinen movilidad con la capacidad de retransmitir claves cuánticas de manera segura y escalable. Los sistemas QKD satelitales han demostrado la viabilidad de enlaces a gran escala; sin embargo, suelen depender de relés de confianza (trusted relays) y de infraestructura terrestre robusta, lo que limita su aplicabilidad en escenarios móviles o de despliegue rápido [Chen et al., 2021; Zhang et al., 2018].

Este estudio aborda estas limitaciones investigando la factibilidad y el rendimiento de una red mesh dinámica basada en Vehículos Aéreos No Tripulados (UAVs o drones) para la distribución de claves QKD. Se desarrolló un modelo de simulación detallado en Python para evaluar la eficiencia en la distribución de claves, analizar estrategias de movilidad, implementar mecanismos de gestión de claves y medir la resiliencia del sistema frente a condiciones adversas, como jamming e intercepción. La simulación se enfocó en escenarios a pequeña escala —drones y robots—, abordando así la fase crítica de "última milla" móvil de las redes cuánticas, donde las restricciones de tamaño, peso y potencia (SWaP) son determinantes. Los resultados muestran que, aunque la arquitectura mesh de drones tiene un fuerte potencial para el despliegue escalable de QKD en entornos complejos, su rendimiento y resiliencia dependen de manera intrínseca de la configuración de la red, la calidad de los enlaces físicos y la adopción de estrategias de seguridad y mitigación adaptativas.

2. METODOLOGÍA

Se adoptó un enfoque basado en simulación para evaluar el desempeño de una red mesh dinámica de drones destinada a la distribución escalable de claves mediante Criptografía Cuántica (QKD). El entorno de simulación se representó como

una cuadrícula tridimensional con límites espaciales definidos, permitiendo modelar de manera realista el espacio operativo en escenarios de campo.

2.1 Entidades del Sistema

La simulación incluyó tres tipos de entidades:

I. **Robots**: Entidades móviles que requieren claves criptográficas. Se inicializan en posiciones aleatorias en el plano terrestre de la cuadrícula (z=0) y tienen un búfer (buffer_size) para almacenar las claves recibidas con un tiempo de vida (key_duration) definido en pasos de simulación. Los robots son capaces de registrar el paso en el que se reciben las claves para rastrear las tasas de entrega.

II. **Estaciones**: Entidades estáticas (opcional, utilizadas para proporcionar contexto espacial o puntos de referencia) con un alcance de comunicación definido (range_). Cada estación poseía un rango de comunicación clásica definido, pero no participó activamente en la distribución de claves.

III. **Drones**: Entidades móviles que operan como nodos de transporte y relé fundamentales en la red cuántica. Son capaces de establecer enlaces de Distribución de Clave Cuántica (QKD) punto a punto con otros drones vecinos, permitiendo la generación e intercambio seguro de material criptográfico. Para la gestión de estas claves, cada dron está provisto de un búfer interno (capacity), que le permite almacenar claves recibidas de otros nodos, facilitando así la propagación multi-salto de la clave cuántica. Una vez que las claves están almacenadas, los drones tienen la función adicional de entregar estas claves a los robots dentro de su rango de comunicación clásica (range_), sirviendo como el puente final para proporcionar criptografía cuántica a los usuarios en tierra.

2.2 Estrategias de Movilidad de Drones

La movilidad de los drones se modela utilizando diferentes estrategias (movement_strategy), incluyendo movimiento aleatorio, movimiento dirigido hacia el robot más cercano y movimiento dirigido hacia áreas con bajo número de claves, para explorar el impacto de la estrategia de movimiento en la eficiencia de la distribución de claves. La velocidad de movimiento es de 1 unidad por paso en cada eje para el movimiento aleatorio, y una magnitud similar para las estrategias dirigidas.

2.3 Modelado de Enlaces Cuánticos (QKD)

El establecimiento de enlaces QKD entre drones se simula probabilísticamente utilizando un KeyManager mejorado. Este modelo de QKD incorpora efectos realistas del canal cuántico, como:

- Pérdida de fotones dependiente de la distancia: Modelada por un coeficiente de atenuación (attenuation_coefficient en dB/unidad de distancia). La probabilidad de transmisión de fotones disminuye exponencialmente con la distancia.
- Turbulencia atmosférica: Simulada por un factor (atmospheric_turbulence_strength) que reduce la probabilidad efectiva de transmisión.
- Ruido de fondo: Modelado por una tasa de ruido (background_noise_rate) que afecta la probabilidad de detecciones falsas.
- Errores de puntería: Simulados por una desviación estándar (pointing_error_std_dev) que reduce la eficiencia de acoplamiento.
- Tasa de error base del protocolo: Un error intrínseco simulado (error_rate) debido a imperfecciones del protocolo QKD o del hardware.

El éxito del establecimiento de una clave depende de si los drones están dentro del alcance (drone_range) y si el QBER simulado, calculado a partir de los bits tamizados después de considerar los efectos del canal, está por debajo de un umbral (qber_threshold). Se simula un proceso simplificado de post-procesamiento (corrección de errores y amplificación de privacidad) que tiene una probabilidad de éxito dependiente del QBER. Una clave se considera establecida si el QKD es exitoso y el post-procesamiento también lo es, proporcionando suficientes bits seguros para derivar una clave criptográfica (actualmente 64 bits para una clave de 8 bytes).

2.4 Canal Clásico para Entrega de Claves

La entrega de claves de drones a robots ocurre cuando un robot está dentro del alcance de comunicación clásica (drone_range) de un dron. Este proceso se simula utilizando un modelo de canal clásico que incluye:

- Pérdida de trayectoria: Modelada por un exponente de pérdida de trayectoria (classical_path_loss_exponent).
- Desvanecimiento: Simulado utilizando un modelo simplificado (por ejemplo, Rayleigh).
- Ruido: Un nivel de ruido de fondo (classical_noise_floor_db).
- Potencia de transmisión: Una potencia de transmisión simulada (classical_tx_power_dbm).

La probabilidad de éxito de la transferencia de claves clásica se determina basándose en la relación señal/ruido (SNR) calculada a partir de estos parámetros, con una probabilidad base de interferencia (base_interference_prob). Un adversario puede intentar interceptar esta transferencia en áreas específicas (interception_params_adversary).

2.5 Gestión de Claves

Se implementó un mecanismo de gestión de claves con expiración automática basada en el TTL. Las claves caducaron al agotarse su tiempo de vida y se eliminaron de los búferes de drones y robots. Además, se incluyó un esquema de revocación: en caso de compromiso, una clave podía marcarse como inválida y removerse de todos los búferes, garantizando la integridad del sistema.

2.6 Escenarios de Evaluación

La simulación se ejecutó bajo múltiples escenarios, variando sistemáticamente parámetros clave: densidad de la red

(número de drones y robots), tamaño del entorno simulado, alcance de comunicación de drones (cuántico y clásico), capacidad del búfer de robots, duración de validez de las claves (TTL), calidad del enlace QKD y condiciones del canal clásico.

Se consideraron también escenarios adversarios, incluyendo interferencia (jamming) en enlaces QKD, intercepción durante la entrega clásica y revocación masiva de claves. Esto permitió evaluar la robustez, resiliencia y efectividad de los mecanismos de seguridad frente a amenazas reales.

2.7 Métricas de Rendimiento

Se midió la tasa promedio de entrega de claves a los robots y el número promedio de claves activas y válidas por robot a lo largo del tiempo, reflejando la disponibilidad continua de claves. Cada escenario se simuló durante 100 pasos temporales, registrándose los datos de rendimiento correspondientes. La Figura 1 ilustra un ejemplo de resultados obtenidos en una simulación base, basada en una versión anterior del modelo, menos realista que los escenarios analizados en este estudio.

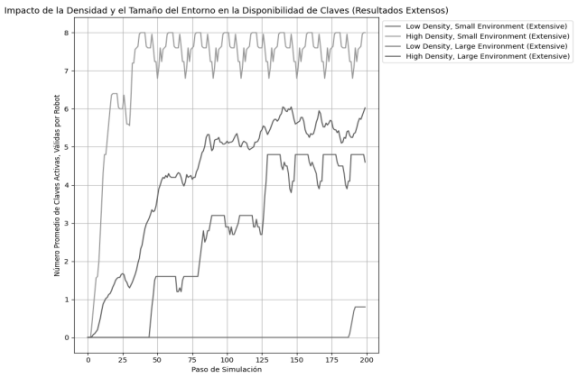


Figura 1: Impacto de la densidad y el tamaño del entorno en la disponibilidad de claves

A continuación, se presenta el pseudocódigo que describe la lógica principal de la simulación de la red mesh de drones para la Distribución de Claves Cuánticas (QKD). Este algoritmo detalla los pasos iterativos para la inicialización del entorno, el movimiento de las entidades, el establecimiento de enlaces cuánticos, la gestión de claves y la entrega a los robots, así como la simulación de condiciones adversas.

```
FUNCTION Simulate_Mesh_Network(grid_size, steps, params):
    grid ← Initialize_Grid(grid_size, params)     // Robots, Drones, Estaciones
    KeyRevocationManager ← Initialize_Key_Manager()
    Metrics ← Initialize_Metrics()
    FOR step ← 0 TO steps - 1 DO
        Simulate_Adversary_Actions(step, grid, params.interception_params_adversary)
        Simulate_Revocation_Event(step, KeyRevocationManager, params.revocation_prob)
        FOR each drone IN grid.drones DO
            Move_Drone(drone, grid.robots, params.movement_strategy)
        // Estrategias: aleatoria, dirigida, por densidad de claves
    // ----- Fase Cuántica -----
    FOR each pair (d1, d2) IN grid.drones DO
        IF distance(d1, d2) ≤ params.drone_qkd_range THEN
            key ← Establish_Key(d1, d2, params)
            IF key ≠ None THEN
                Store_Key_In_Mesh(key, d1, d2)
    // ----- Fase Clásica -----
    FOR each robot IN grid.robots DO
        FOR each drone IN grid.drones DO
            IF distance(drone, robot) ≤ params.drone_classical_range THEN
                IF Channel_Success(drone, robot, params) THEN
                    key_data ← drone.Derive_And_Provide_Key(robot)
                    IF key_data ≠ None THEN
                        robot.Add_Key(key_data, step)
    Update_Key_Buffers(grid.robots, KeyRevocationManager)    // TTL + revocación
    Calculate_Performance_Metrics(step, grid.robots, Metrics)
  END FOR
  RETURN Metrics.results
FUNCTION Establish_Key(e1, e2, params):
  IF Jamming_Check(params) THEN RETURN None
  η_total ← Calculate_Channel_Efficiency(
              distance(e1, e2),
              params.attenuation_coefficient,
              params.atmospheric_turbulence_strength,
              params.pointing_error_std_dev)
  E ← Compute_QBER(η_total,
               params.background_noise_rate,
               params.error_rate)
  IF E > params.qber_threshold THEN RETURN None
  IF PostProcessing_Success(E) THEN
    R_secure ← Compute_Secure_Bits(E)
    IF R_secure ≥ params.secure_bits_required THEN
      RETURN Generate_Key_Data(R_secure)
  END IF
  RETURN None
```

3. RESULTADOS

Se realizaron simulaciones exhaustivas para evaluar el rendimiento de la red mesh de drones QKD dinámica bajo una amplia gama de condiciones operativas, ambientales y de seguridad. Los escenarios variaron sistemáticamente parámetros clave como la densidad de drones y robots, el tamaño del entorno, la calidad de los enlaces QKD, las condiciones del canal clásico, las estrategias de movimiento, los ataques adversarios y los eventos de gestión de claves como la revocación. El rendimiento se midió principalmente por el número promedio de claves activas y válidas por robot a lo largo del tiempo, una métrica que refleja directamente la capacidad de la red para mantener a las entidades finales provistas de material criptográfico utilizable. Las siguientes subsecciones presentan los hallazgos clave de estas simulaciones detalladas.

3.1 Impacto de la Densidad y el Tamaño del Entorno

Para comprender la influencia de la escala de la red y el entorno físico, se simularon escenarios variando la densidad de robots y drones (baja, media, alta) y el tamaño del entorno (pequeño, medio, grande). Los resultados obtenidos, ilustrados en la Figura 2, demuestran claramente cómo estos factores fundamentales afectan la disponibilidad de claves a lo largo del tiempo.

Las simulaciones base exploraron cómo la densidad de robots y drones y el tamaño del entorno afectan la disponibilidad de claves.

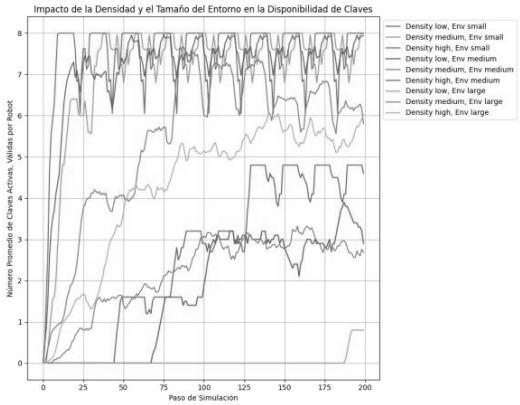


Figura 2: Impacto de la Densidad y el Tamaño del Entorno

3.2 Impacto de la Calidad del Enlace QKD y Condiciones Ambientales

La calidad de los enlaces cuánticos y la influencia de las condiciones ambientales son críticas para el éxito de la QKD. Se llevaron a cabo simulaciones variando la tasa de error base del protocolo QKD, el umbral de QBER, la turbulencia atmosférica simulada y el ruido de fondo. La Figura 3 presenta cómo estas variaciones en la calidad del enlace y las condiciones ambientales impactan el número promedio de claves activas y válidas disponibles para los robots.

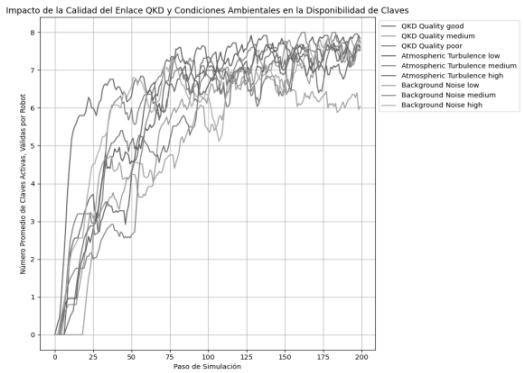


Figura 3: Impacto de la Calidad del Enlace QKD y Condiciones Ambientales en la Disponibilidad de Claves

3.3 Impacto de Ataques Adversarios

Para evaluar la robustez de la red frente a amenazas externas, se simularon escenarios con diferentes tipos de ataques adversarios: jamming en los enlaces QKD y intercepción de la entrega de claves a robots. Estos escenarios se compararon con una línea base sin adversario. La Figura 4 muestra el impacto de estos ataques dirigidos en la disponibilidad de claves a lo largo del tiempo.

Figura 4: Impacto de Ataques Adversarios en la Disponibilidad de Claves

3.4 Impacto de la Gestión de Claves (Revocación)

La gestión de claves es esencial para la seguridad, particularmente la capacidad de revocar claves comprometidas. Se simuló un evento de revocación de claves en un paso específico de la simulación y se comparó el rendimiento con un escenario base sin revocación, así como con un escenario de revocación con una mayor duración de clave. La Figura 5 ilustra el efecto de la revocación en el número promedio de claves activas y válidas.

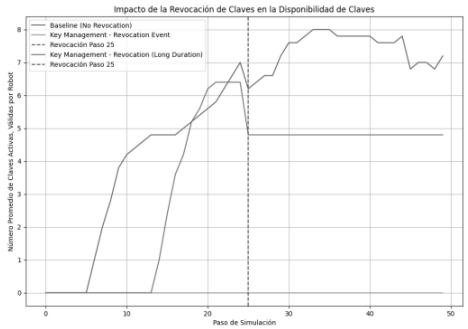


Figura 5: Impacto de la Revocación de Claves en la Disponibilidad de Claves

3.5 Impacto de las Estrategias de Movimiento

La forma en que los drones se mueven en el entorno dinámico influye directamente en su capacidad para establecer enlaces QKD y encontrarse con robots para entregar claves. Se compararon diferentes estrategias de movimiento de drones: movimiento aleatorio (línea base), movimiento dirigido hacia el robot más cercano y movimiento dirigido hacia áreas con bajo número de claves. La Figura 6 presenta el impacto de estas estrategias en la disponibilidad de claves para los robots a lo largo del tiempo.

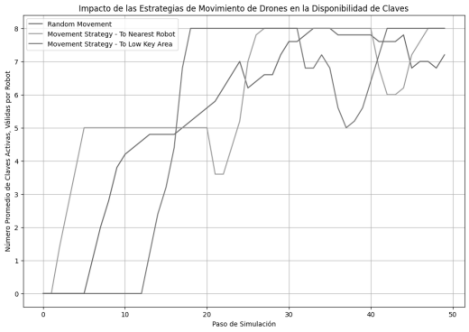


Figura 6: Impacto de las Estrategias de Movimiento de Drones en la Disponibilidad de Claves

3.6 Impacto de las Interacciones entre Parámetros

Más allá del impacto individual de los parámetros, es crucial entender cómo interactúan entre sí. Se diseñaron escenarios para explorar la combinación de diferentes factores, como alta densidad en un entorno grande con alta tasa de error, o alta interferencia combinada con estrategias de movimiento dirigidas o ataques. La Figura 7 muestra los resultados de estos escenarios de interacción, destacando los efectos complejos que pueden surgir.

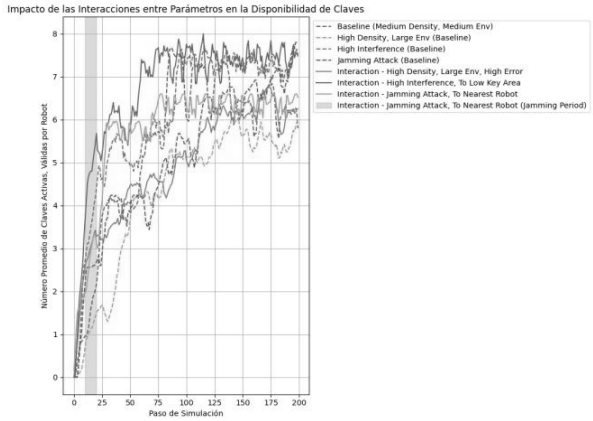


Figura 7: Impacto de las Interacciones entre Parámetros en la Disponibilidad de Claves

4. DISCUSIÓN

Los resultados de las simulaciones exhaustivas proporcionan evidencia cuantitativa detallada sobre el rendimiento de la red mesh dinámica de drones para distribución cuántica de claves (QKD) bajo diferentes condiciones operativas, ambientales y de seguridad. Esta sección interpreta los hallazgos en el contexto de la literatura existente y analiza la contribución específica de la arquitectura propuesta.

4.1 Impacto de Factores Operativos, Ambientales y de Seguridad

Las simulaciones revelan cómo distintos factores físicos y de red influyen de manera interdependiente en la eficiencia y confiabilidad del sistema. La Figura 2 muestra que una mayor densidad de drones y robots incrementa significativamente el número promedio de claves activas por robot, especialmente en entornos de menor tamaño. Este comportamiento se explica por la mayor probabilidad de encuentros cercanos, que favorecen tanto el establecimiento de enlaces cuánticos entre drones como la posterior entrega de claves clásicas a los robots. Sin embargo, en entornos amplios, incluso con densidades relativamente altas, la disponibilidad de claves disminuye, evidenciando la dificultad de mantener cobertura y conectividad en espacios extensos. Estos resultados confirman que la proximidad y la densidad de nodos son determinantes en la eficiencia de una red QKD dinámica basada en movilidad.

La calidad de los enlaces cuánticos y las condiciones ambientales también demostraron ser factores críticos para el desempeño del sistema. Tal como se observa en la Figura 3, la degradación de los canales cuánticos —por ejemplo, a través de un incremento en la tasa de error cuántico (QBER) o la presencia de ruido de fondo— reduce la probabilidad de establecimiento exitoso de claves, limitando la disponibilidad general. De forma similar, la interferencia en el canal clásico afecta la entrega de claves hacia los robots, lo que subraya la necesidad de emplear tecnologías QKD robustas, técnicas de mitigación ambiental (como óptica adaptativa, en caso de ser viable a las altitudes operativas de los drones) y protocolos de comunicación resilientes ante interferencias electromagnéticas o físicas.

En cuanto a la seguridad, la Figura 4 evidencia que los ataques adversarios, particularmente el jamming sobre los enlaces cuánticos y la intercepción de la entrega clásica de claves, provocan una reducción notable en la cantidad de claves activas disponibles. Durante los periodos de ataque combinado, la red muestra la degradación más severa y prolongada, destacando la vulnerabilidad inherente de las comunicaciones cuánticas y clásicas en entornos sin infraestructura fija. Este comportamiento resalta la importancia de diseñar e implementar contramedidas activas de detección y mitigación que fortalezcan tanto la capa cuántica como la clásica del sistema.

El análisis de la Figura 5 muestra que el mecanismo de revocación de claves implementado resulta efectivo para eliminar rápidamente las claves comprometidas y recuperar la integridad del sistema. Sin embargo, la velocidad con que se restablece la disponibilidad de claves después de un evento de revocación depende directamente de la capacidad del sistema para generar y distribuir nuevas claves seguras. Estos resultados revelan un compromiso fundamental entre la duración de las claves —que contribuye a mantener la disponibilidad— y la exposición potencial ante una vulneración.

Finalmente, los resultados presentados en la Figura 6 indican que las estrategias de movilidad tienen un impacto significativo en la eficiencia global del sistema. Las estrategias dirigidas, como el movimiento hacia robots cercanos o hacia regiones con menor cantidad de claves, superan al movimiento aleatorio en la mayoría de los escenarios simulados. Este comportamiento sugiere que la movilidad inteligente puede optimizar la frecuencia de encuentros exitosos y, por ende, mejorar la eficiencia de distribución, constituyendo un área

clave para el diseño de redes cuánticas dinámicas más adaptativas.

4.2 Contribución Específica respecto a Estudios Previos

La investigación en QKD ha avanzado en enlaces fijos (fibra) y enlaces de largo alcance (satélite). Sin embargo, la brecha crítica en la "última milla cuántica" móvil, especialmente en entornos dinámicos y sin infraestructura, ha permanecido en gran medida inexplorada a nivel de arquitectura de red.

Estudios experimentales previos han demostrado la viabilidad de enlaces QKD punto a punto utilizando drones: por ejemplo, se logró una Tasa de Clave Secreta (SKR) de 8.48 kHz a 200 m utilizando el protocolo BB84 decoy-state. De manera similar, los análisis teóricos de UAVs como relés cuánticos han establecido una capacidad máxima de pérdida de canal de 26 dB para mantener una tasa de clave viable.

El presente estudio avanza en esta área de investigación al abordar el desafío a nivel de red mesh dinámica y escalable, con la contribución específica de:

Enfoque Arquitectónico: El trabajo se centra en el rendimiento a largo plazo de una red multi-salto (mesh) donde los drones actúan como relés de confianza y gestores de claves en 3D, un análogo cuántico faltante en las comunicaciones móviles clásicas.

Evaluación de Seguridad Operacional: Se cuantifica la resiliencia práctica del sistema frente a amenazas dinámicas (jamming e intercepción) y fallos operativos (revocación), factores que son cruciales para el despliegue en campo, pero a menudo se omiten en los análisis de enlace físico puro.

Impacto de la Movilidad Inteligente: Se demuestra que la capa de control de movilidad (estrategias dirigidas) es un factor determinante para la eficiencia de la red, mejorando la disponibilidad de claves en comparación con el movimiento aleatorio (Figura 6).

4.3 Relación con el Trabajo Relacionado

Los resultados obtenidos se alinean con la literatura existente sobre redes ad-hoc móviles y enjambres de drones, donde la densidad de nodos, la conectividad y la calidad del canal son determinantes para la estabilidad del sistema. Asimismo, refuerzan los desafíos conocidos de la QKD en espacio libre, particularmente su sensibilidad a las condiciones atmosféricas y a la geometría de los enlaces. La contribución principal de este trabajo radica en la evaluación sistemática de estos factores en el contexto de una arquitectura mesh escalable que distribuye claves a entidades móviles tridimensionales, abordando así una brecha de investigación identificada en la integración de movilidad, seguridad y escalabilidad en entornos QKD.

4.3.1 Análisis Comparativo de Rendimiento

El valor de la arquitectura propuesta se enfatiza mediante una comparación directa entre las métricas de rendimiento reportadas en estudios previos y las obtenidas en este trabajo. Mientras que la mayoría de los enfoques existentes se centran en la eficiencia del enlace físico —como la Tasa de Clave Secreta (SKR) o la pérdida de canal (p. ej., 8.48 kHz a 200m o pérdida máxima de 26 dB en trabajos de Conrad et al. (2023) y MDI-QKD/OAM (2024), respectivamente)—, la arquitectura presentada introduce y se evalúa bajo una métrica de red más holística: la Disponibilidad de Claves. Esta métrica refleja la capacidad sostenida de intercambio seguro en entornos dinámicos y tridimensionales, un aspecto fundamental para la aplicabilidad real.

En contraste con los sistemas que se enfocan en el rendimiento del enlace individual, este modelo de red mesh simulada enfatiza la gestión colaborativa y la movilidad dirigida. Los resultados demuestran que esta arquitectura multi-salto logra una mayor eficiencia sostenida en la disponibilidad de claves (métrica de red), lo que se traduce en mejor escalabilidad, resiliencia tridimensional y soporte robusto para escenarios de última milla, donde los enfoques punto a punto son insuficientes.

4.4 Implicaciones Prácticas

Los hallazgos sugieren que las redes mesh dinámicas de drones QKD son técnicamente viables para proporcionar distribución de claves seguras en entornos sin infraestructura, aunque su desempeño depende de un diseño cuidadoso del sistema. Es necesario considerar la interacción entre la movilidad de los drones, la robustez de los canales cuánticos y clásicos, la gestión dinámica de claves y la protección ante ataques tanto cuánticos como convencionales. Una integración equilibrada de estos componentes permitirá desarrollar sistemas más confiables y eficientes.

4.4 Limitaciones del Estudio

Este estudio se basa en un entorno de simulación que, aunque avanzado, simplifica diversos aspectos del mundo real. Los modelos de QKD y de los canales clásicos representan aproximaciones idealizadas de la física y del ruido ambiental. El modelo de adversario es limitado y no contempla todos los posibles vectores de ataque. Asimismo, no se incluyen restricciones físicas como el consumo energético, la capacidad de carga de los drones o las regulaciones de vuelo en espacios complejos.

En conjunto, los resultados demuestran que las redes mesh dinámicas de drones QKD poseen un potencial significativo para entornos desafiantes, pero su efectividad depende de la calidad del enlace, la resiliencia ante amenazas y la implementación de estrategias de movilidad y gestión adaptativas. Estos hallazgos orientan las conclusiones y definen las direcciones principales para el trabajo futuro.

5. CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

Este estudio exploró la viabilidad y el rendimiento de redes mesh dinámicas de drones para la Distribución de Claves Cuánticas (QKD) escalable en entornos desafiantes mediante un modelo de simulación tridimensional detallado. Se desarrolló un entorno 3D con drones portadores de claves y robots móviles, incorporando canales cuánticos y clásicos realistas, estrategias de movilidad diferenciadas, mecanismos básicos de gestión de claves y escenarios con ataques adversarios. Las simulaciones, ejecutadas bajo diversas

configuraciones de red y condiciones operativas, proporcionaron información cuantitativa sobre los factores que determinan la efectividad de este enfoque.

En conjunto, los resultados demuestran que las redes mesh de drones representan una alternativa prometedora para habilitar QKD en escenarios donde la infraestructura fija resulta impracticable o vulnerable. El análisis confirma que la densidad de nodos, la calidad de los enlaces, las condiciones ambientales, la gestión de claves y las estrategias de movilidad influyen de forma determinante en la disponibilidad y eficiencia de la distribución de claves. Asimismo, la simulación de ataques evidenció la necesidad de implementar contramedidas robustas en ambas capas —cuántica y clásica— para mantener la seguridad y continuidad del servicio.

5.1 Cumplimiento de Objetivos

Los objetivos planteados en este estudio fueron alcanzados de manera satisfactoria:

I. Modelado y simulación del entorno dinámico: Se desarrolló un modelo tridimensional con representación realista de drones, robots y estaciones, integrando modelos físicos de canales cuánticos y clásicos.
II. Evaluación de efectividad: Se diseñaron y ejecutaron escenarios que variaron sistemáticamente parámetros como densidad, tamaño del entorno, calidad de canal y condiciones ambientales, cuantificando el rendimiento a través de métricas de disponibilidad de claves.
III. Análisis de movilidad, gestión y ataques: Se estudiaron estrategias de movimiento, revocación de claves y ataques de jamming e intercepción, obteniendo evidencia cuantitativa sobre su impacto en la disponibilidad y eficiencia del sistema.
IV. Evaluación global del enfoque: Se generaron resultados empíricos que demuestran el potencial de la arquitectura mesh para proveer QKD escalable y robusta en entornos dinámicos, identificando al mismo tiempo sus principales limitaciones

5.2 Hallazgos Clave

Las simulaciones evidenciaron que una mayor densidad de drones y menor tamaño de entorno incrementan significativamente la disponibilidad de claves. La calidad del enlace QKD y las condiciones ambientales influyen directamente en la tasa de éxito de las transmisiones, mientras que los ataques adversarios reducen de forma severa la cantidad de claves activas. La revocación se consolidó como un mecanismo esencial de control, y las estrategias de movilidad dirigidas mostraron una mejora consistente en la eficiencia de distribución. Estos resultados fortalecen la comprensión de la dinámica y los desafíos de las redes QKD móviles en entornos tridimensionales complejos.

5.3 Trabajo Futuro

A partir de los hallazgos y reconociendo las limitaciones del modelo actual, se identifican varias líneas prioritarias de investigación:

I. Modelado avanzado y validación experimental: Integrar modelos físicos más detallados de protocolos QKD (por ejemplo, BB84, E91) y efectos de canal (depolarización, acoplamiento fibra-espacio), junto con validación experimental mediante plataformas de drones reales en entornos controlados.
II. Optimización de control, movilidad y asignación de claves: Desarrollar algoritmos cooperativos de planificación de rutas y control distribuido de drones que optimicen la entrega de claves según el estado de la red y las necesidades dinámicas de los receptores.
III. Protocolos resilientes de red y gestión de claves: Diseñar protocolos de enrutamiento adaptativo y gestión de claves descentralizada con autenticación mutua, revocación segura y mecanismos de borrado en drones comprometidos.
IV. Evaluación formal de seguridad y mitigación de ataques: Extender el análisis a adversarios avanzados, incluyendo drones maliciosos o ataques de suplantación, e implementar estrategias anti-jamming y de detección de intrusiones en tiempo real.
V. Consideraciones de hardware y despliegue práctico: Incorporar restricciones reales de peso, energía, ancho de banda y regulación aérea, así como explorar arquitecturas híbridas que combinen estaciones fijas con drones móviles para mejorar cobertura y resiliencia.

Al abordar estas áreas, la investigación futura podrá avanzar hacia la implementación práctica de redes mesh de drones QKD eficientes, seguras y escalables, contribuyendo al desarrollo de infraestructuras de comunicación con seguridad cuántica en entornos dinámicos del mundo real.

REFERENCIAS

Chen, Y.A., Zhang, Q., Chen, T.Y., Cai, W.Q., Liao, S.K., Zhang, J., Chen, K., Yin, J., Ren, J.G., Chen, Z., et al. (2021). An integrated space-to-ground quantum communication network over 4600 kilometres. Nature, 589, 785–789.

Conrad, A., Cochran, R. D., Isaac, S., Sanchez-Rosales, D., Javid, T., Kwiat, P., and Gauthier, D. J. (2023). Quantum key distribution system between two aerial drones separated by 10 m. In 2023 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2023), San Jose, United States. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

Diamanti, E., Lo, H.-K., Qi, B., and Yuan, Z. (2016). Practical challenges in quantum key distribution. npj Quantum Information, 2(1), 16025.

Liao, S.-K., Cai, W.-Q., Liu, W.-Y., Zhang, L., Li, Y., Ren, J.-G., Yin, J., Shen, Q., Cao, Y., Li, Z.-P., Li, F.-Z., Chen, X.-W., Sun, L.-H., Jia, J.-J., Wu, J.-C., Jiang, X.-J., Wang, J.-F., Huang, Y.-M., Wang, Q., Zhou, Y.-L., Deng, L., Xi, T., Ma, L., Hu, T., Zhang, Q., Chen, Y.-A., Liu, N.-L., Wang, X.-B., Zhu, Z.-C., Lu, C.-Y., Shu, R., Peng, C.-Z., Wang, J.-Y., and Pan, J.-W. (2017). Satellite-to-ground quantum key distribution. Nature, 549, 43–47.

Lo, H.-K., Curty, M., and Tamaki, K. (2014). Secure quantum key distribution. Nature Photonics, 8, 595.

Nauerth, S., Moll, F., Rau, M., Fuchs, C., Horwath, J., Frick, S., and Weinfurter, H. (2013). Air-to-ground quantum communication. Nature Photonics, 7, 382–6.

Quintana, C., Erry, G., Gomez, A., Thueux, Y., Faulkner, G. E., and O'Brien, D. C. (2019). Design of a Holographic Tracking Module for Long-Range Retroreflector Free-Space Systems. Applied Optics, 55(26), 7173–7178.

Tu, C., Shen, J., Dai, J., Zhang, L., and Wang, J. (2022). A lower size, weight acquisition and tracking system for airborne quantum communication. IEEE Photonics Journal, 14, 7356908.

Xu, F., Ma, X., Zhang, Q., Lo, H.-K., and Pan, J.-W. (2020). Secure quantum key distribution with realistic devices. Reviews of Modern Physics, 92(2), 025002.

Xue, Y., Chen, W., Wang, S., Yin, Z.-Q., Shi, L., and Han, Z. (2021). Airborne quantum key distribution: A review. Chinese Optics Letters, 19(12), 122702.

Zhang, Q., Xu, F., Chen, Y.-A., Peng, C.-Z., and Pan, J.-W. (2018). Large scale quantum key distribution: challenges and solutions [Invited]. Optics Express, 26(18), 24260–24273.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Simulation of the chlorobenzene production process using DWSIM

Maritza Jaquelline Huazo Mejia, Judith Marisol Torres Velázquez, Guillermo Centeno Nolasco, Lorenzo Antonio Cruz Santiago*

Tecnológico Nacional de México / TES de Cuautitlán Izcalli, Av. Nopaltepec s/n Col. La Perla C.P. 54740, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, Tel: (55) 58 64 31 70 -71

**e-mail: lorenzo.cs@cuautitlan.tecnm.mx*

Abstract: This case study proposes an innovative design for the chlorobenzene production process, utilizing the DWSIM simulation tool, with a focus on energy efficiency and process sustainability. Chlorobenzenes, key compounds in the manufacture of pesticides, dyes, drugs, and solvents, are produced by direct chlorination of benzene. This process faces challenges related to energy consumption and controlling product selectivity. The study encompasses the development of matter and energy balances, the development of process flow diagrams, and the computational modeling of a plant capable of producing 20000 metric tons of monochlorobenzene annually, including at least 2000 metric tons of dichlorobenzene, implementing various optimization strategies to reduce energy consumption without compromising the quality of the final product.

Keywords: Chlorobenzenes, Process Simulation, DWSIM, Optimization, Process Sustainability

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los problemas medioambientales que experimenta el planeta han aumentado de manera desmesurada, impactando negativamente la calidad de vida de todos sus habitantes. Uno de los mayores retos de la sociedad es disminuir todos los contaminantes generados principalmente por la industria del sector químico, cuyo impacto es especialmente significativo debido a la complejidad de los procesos involucrados y la naturaleza de los compuestos producidos.

En este contexto, los clorobencenos destacan como compuestos aromáticos esenciales en la industria química, utilizados como intermediarios en la fabricación de productos como pesticidas, colorantes, fármacos y solventes industriales (Brahushi et al, 2017; National Center for Biotechnology Information, 2025). La producción de monoclorobenceno y diclorobenceno para el sector químico a nivel mundial, actualmente se estima una producción anual total de 702.82 kilotones en 2025 y se espera que alcance los 831.91 kilotones en 2030, con una tasa de crecimiento del 3.43 % durante el período de pronóstico (2025-2030).

Los principales factores que impulsan el crecimiento de los ingresos en el mercado de clorobencenos son la creciente demanda de nitroclorobenceno, este compuesto se presenta como producto intermediario en la fabricación de caucho, productos químicos agrícolas, aditivos de aceite, antioxidantes, colorantes y pigmentos (Tamaño Del Mercado De Clorobenceno | Mordor Intelligence, n.d.).

Industrialmente, la mayoría de clorobencenos son producidos mediante la reacción de benceno líquido y cloro gaseoso en presencia de un catalizador a temperatura moderada y presión atmosférica. El cloruro de hidrógeno es un subproducto de esta reacción. Generalmente se obtienen mezclas de isómeros y compuestos con diferentes grados de cloración, debido a que cualquier clorobenceno puede ser clorado hasta la formación de hexaclorobenceno. La velocidad de cloración para cualquier compuesto clorado depende de su estructura y, debido a esto, el grado de cloración y el tamaño del isómero cambian continuamente durante el curso de la reacción. Mediante la alteración de estas condiciones de reacción y el cambio de catalizador utilizado se puede variar la relación de los diferentes productos clorados dentro de ciertos límites (Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 2000).

El proceso de producción de monoclorobenceno (MCB) y diclorobenceno (DCB) consiste en la cloración de benceno a partir de una reacción bifásica en presencia de $FeCl_3$ como catalizador. Este proceso también conduce a una reacción secundaria no deseada donde el MCB se clora obteniendo DCB. Las reacciones presentes son las siguientes:

$$C_6H_6 + Cl_2 \rightarrow C_6H_5Cl + HCl$$

$$C_6H_5Cl + Cl_2 \rightarrow C_6H_4Cl_2 + HCl$$

El proceso consta de tres etapas:

1. Etapa de reacción, donde se lleva a cabo la cloración del benceno para la producción de MCB y DCB.
2. Etapa de purificación, donde se procede a purificar el producto hasta la concentración deseada.
3. Línea de gases para manejar los subproductos gaseosos, como HCl.

Debido a las etapas involucradas en la producción de clorobencenos se plantean importantes desafíos técnicos y ambientales, particularmente en términos de consumo energético y generación de subproductos no deseados, lo que resalta la necesidad de estrategias avanzadas para mejorar la

eficiencia del proceso y reducir su impacto ambiental. Para enfrentar este problema se dan soluciones que se analizan en el campo y también de manera computacional, siendo esta, una de las alternativas más viables para la industria al no generar gasto ni pérdida en estos estudios. Es por ello por lo que la simulación de procesos químicos es la herramienta ideal para diseñar, analizar, optimizar y experimentar dentro de la industria, ya que al ser una tecnología computacional permite predecir el comportamiento de los equipos (Dimian et al, 2014).

Este trabajo plantea la simulación y optimización del proceso de producción de monoclorobenceno (MCB) y diclorobenceno (DCB) utilizando el software de simulación DWSIM; una herramienta que permite modelar las operaciones químicas bajo condiciones reales para evaluar y mejorar el balance de materia y energía, minimizando los costos operativos y el desperdicio de recursos (Pérez et al, 2022). La investigación se orienta al diseño de un sistema capaz de producir 20000 toneladas anuales de MCB, garantizando al menos 2000 toneladas anuales de DCB como subproducto, con un enfoque en la eficiencia energética. De esta manera, la optimización energética no solo contribuye a la sostenibilidad, sino que también reduce las emisiones de carbono asociadas al proceso.

2. METODOLOGÍA

En esta sección se presenta el desarrollo de los balances de materia y energía fundamentales en la comprensión del comportamiento del sistema para establecer las bases para el análisis de la optimización, obteniendo los datos de entrada y salida tanto del diagrama de flujo como de cada equipo (ver **Figuras IC-1** e **IC-2** de la sección de Información Complementaria: https://1drv.ms/f/c/fdd3d651627e2fd2/EiCyQ6IWx-pKll109C0zR88BDbx4q7lHV8ZhMOTYDQgqCg).

2.1 Balance de materia

A continuación, se presentan las ecuaciones de los distintos equipos involucrados de manera previa a las tablas del balance de materia, los cuales fueron cálculos mediante un proceso de ingeniería inversa.

Torre de destilación de clorobencenos (T-104)

Para lograr una producción de 20000 toneladas anuales de MCB y 2000 toneladas anuales de DCB como subproducto, se comienza con el análisis de la torre de destilación T-104 (**Figura 1**) de acuerdo con la información proporcionada a continuación:

- *Especificaciones de salida*

$$\boldsymbol{F20} = 20{,}000\,\frac{ton}{\text{año}} \quad MCB = 99.7\%w \quad DCB = 0.3\%w$$

$$\boldsymbol{F21} = 2{,}000\,\frac{ton}{\text{año}} \quad MCB = 0.4\%w \quad DCB = 99.6\%w$$

- *Balance General de Masa (BGM)*

$$F19 = F20 + F21$$

- *Balance de Masa por Componentes (BMC)*

$$MCB = (F19)(\%w_{MCB(F19)}) + (F20)(\%w_{MCB(F20)}) + (F21)(\%w_{MCB(F21)})$$

$$DCB = (F19)(\%w_{DCB(F19)}) + (F20)(\%w_{DCB(F20)}) + (F21)(\%w_{DCB(F21)})$$

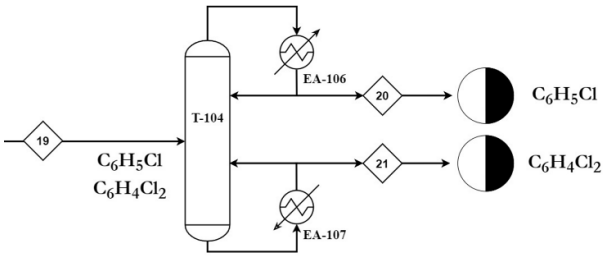


Figura 1. Diagrama del equipo T-104 (Torre de destilación de clorobencenos)

Torre de destilación de benceno (T-103)

Con base en la estequiometría de las reacciones es posible realizar los cálculos para las cantidades de agua (A) y benceno (B) que llegan a la torre de destilación T-103 (**Figura 2**):

- *Balance General de Masa (BGM)*

$$F17 = F18 + F19$$

- *Balance de Masa por Componentes (BMC)*

$$A = (F17)(\%w_{A(F17)}) + (F18)(\%w_{A(F18)})$$

$$B = (F17)(\%w_{B(F17)}) + (F18)(\%w_{B(F18)})$$

$$MCB = (F17)(\%w_{MCB(F17)}) + (F19)(\%w_{MCB(F19)})$$

$$DCB = (F17)(\%w_{DCB(F17)}) + (F19)(\%w_{DCB(F19)})$$

Lavador de gases (L-101)

Debido a que existen trazas de HCl provenientes del sistema de reacción se requieren de cálculos para un equipo de neutralización mostrado en la **Figura 3**:

- *Reacción involucrada*

$$NaOH + HCl \rightarrow NaCl + H_2O$$

- *Balance General de Masa (BGM)*

$$F14 + F15 = F16 + F17$$

- *Balance de Masa por Componentes (BMC)*

$$A = (F14)(\%W_{A(F14)}) + (F16)(\%W_{A(F16)}) + (F15)(\%W_{A(F15)}) + (F17)(\%W_{A(F17)})$$

$$B = (F14)(\%W_{B(F14)}) + (F16)(\%W_{B(F16)})$$

$$MCB = (F14)(\%W_{MCB(F14)}) + (F16)(\%W_{MCB(F16)})$$

$$DCB = (F14)(\%W_{DCB(F14)}) + (F16)(\%W_{DCB(F16)})$$

$$NaOH = (F15)(\%W_{NaOH(F15)}) + (F17)(\%W_{NaOH(F17)})$$

$$HCl = (F14)(\%W_{HCl(F14)})$$

$$NaCl = (F17)(\%W_{NaCl(F17)})$$

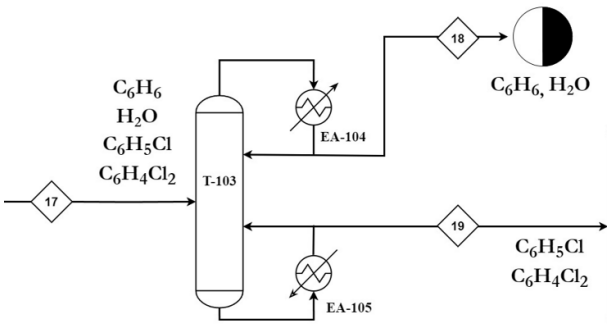


Figura 2. Diagrama del equipo T-103 (Torre de destilación de benceno)

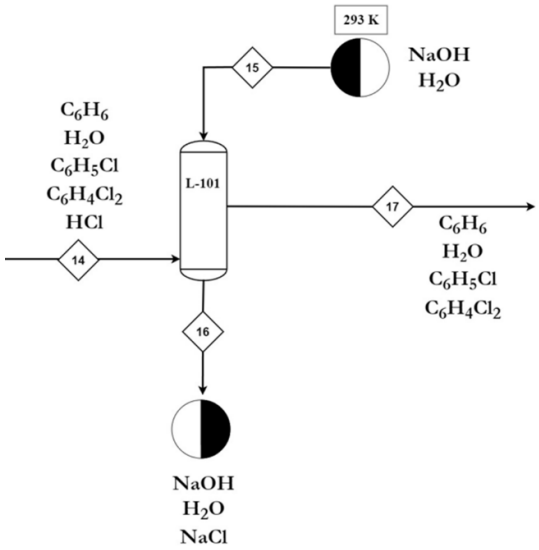


Figura 3. Diagrama del equipo L-101 (Lavador de gases)

Línea de reactores de cloración catalítica (R-101 y R-102)

De acuerdo con las reacciones de cloración y con base en su estequiometría es posible determinar las cantidades requeridas de cloro y benceno a la entrada de los equipos mostrados en la **Figura 4**:

- *Reacciones involucradas*

$$C_6H_6 + Cl_2 \rightarrow C_6H_5Cl + HCl$$

$$C_6H_5Cl + Cl_2 \rightarrow C_6H_4Cl_2 + HCl$$

- *Balance General de Masa (BGM)*

$$F4 + F5 = F11 + F14$$

- *Balance de Masa por Componentes (BMC)*

$$A = (F4)(\%W_{A(F4)}) + (F14)(\%W_{A(F14)})$$

$$B = (F4)(\%W_{B(F4)}) + (F11)(\%W_{B(F11)}) + (F14)(\%W_{B(F14)})$$

$$Cl_2 = (F5)(\%W_{Cl_2(F5)}) + (F11)(\%W_{B(F11)})$$

$$MCB = (F14)(\%W_{MCB(F14)})$$

$$DCB = (F14)(\%W_{DCB(F14)})$$

$$HCl = (F11)(\%W_{HCl(F11)}) + (F14)(\%W_{HCl(F14)})$$

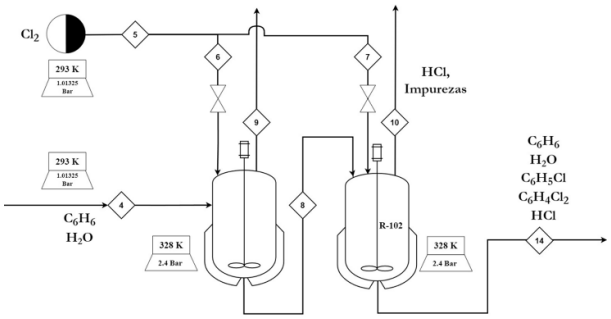


Figura 4. Diagrama de los equipos R-101 y R-102 (Línea de reactores de cloración catalítica)

Mezclador de corrientes (M-102)

Para la recuperación de HCl como subproducto se requieren cálculos para el equipo de mezclado M-101 (**Figura 5**):

- *Balance General de Masa (BGM)*

$$F9 + F10 = F11$$

- *Balance de Masa por Componentes (BMC)*

$$B = (F9)(\%W_{B(F9)}) + (F10)(\%W_{B(F10)}) + (F11)(\%W_{B(F11)})$$

$$HCl = (F9)(\%W_{HCl(F9)}) + (F10)(\%W_{HCl(F10)}) + (F11)(\%W_{HCl(F11)})$$

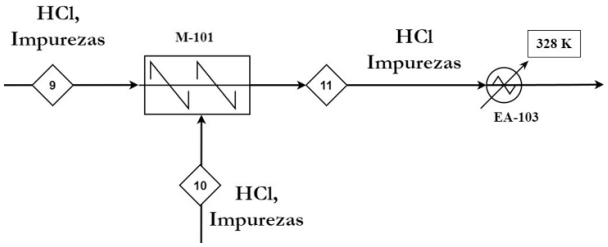


Figura 5. Diagrama del equipo M-102 (Mezclador de corrientes)

Torre de absorción de carbón activo (T-102)

El HCl recuperado contiene impurezas que son removidas mediante la torre de absorción T-102 (**Figura 6**):

- *Balance General de Masa (BGM)*

$$F11 = F12 + F13$$

- *Balance de Masa por Componentes (BMC)*

$$B = (F11)(\%W_{B(F11)})$$

$$HCl = (F11)(\%W_{HCl(F11)}) + (F12)(\%W_{HCl(F12)})$$

$$Impurezas = (F13)(\%W_{HCl(F13)})$$

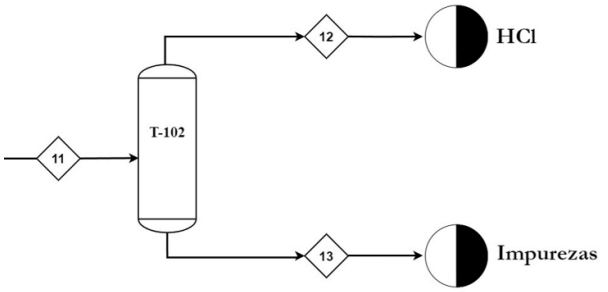


Figura 6. Diagrama del equipo T-102 (Torre de absorción de carbón activo)

Torre de eliminación de humedad (T-101)

Debido a que el benceno es alimentado al proceso con 0.05%w de humedad, la misma debe ser removida antes de ingresar al sistema de reacción mediante el equipo T-101 mostrado en la **Figura 7**:

- *Balance General de Masa (BGM)*

$$F1 = F2 + F3$$

- *Balance de Masa por Componentes (BMC)*

$$A = (F1)(\%W_{A(F1)}) + (F2)(\%W_{A(F2)}) + (F3)(\%W_{A(F3)})$$

$$B = (F1)(\%W_{B(F1)}) + (F2)(\%W_{B(F2)})$$

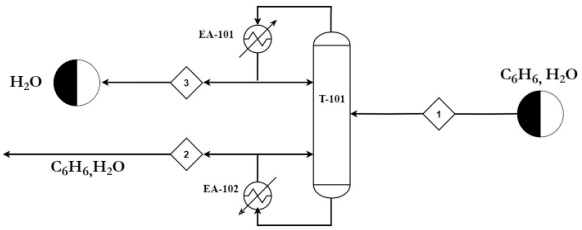


Figura 7. Diagrama del equipo T-101 (Torre de eliminación de humedad)

2.2 Balance de energía

A continuación, se presentan las ecuaciones de los equipos principales del proceso correspondientes al sistema de reacción (**Figura 4**) y a la torre de destilación de clorobencenos (**Figura 1**).

Equipo R-101

- *Balance General*

$$Q4 + Q6 + Qreacción = Q8 + Q9 + Qreactor$$

- *Cálculo de Q4, Q6, Q8 y Q9*

$$Q = n * Cpmezcla * \Delta T$$

$$Cp = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$CPmezcla = \sum X * Cp$$

- *Cálculo de la Qreacción*

$$\Delta Hr(reacción) = \sum n\Delta Hf(productos) - \sum n\Delta Hf(reactivos)$$

$$Q(reacción) = n * \Delta Hf(reacción)$$

- *Despeje de Qreactor*

$$Qreactor = Q4 + Q6 + Qreacción - Q8 - Q9$$

Equipo T-104

- *Balance General*

$$Q19 = Q20 + Q21 + Qequipo$$

- *Cálculo de Q19 y Q21 (fase líquida)*

$$Q = n * Cpmezcla * \Delta T$$

$$Cp = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$CPmezcla = \sum X * Cp$$

- *Cálculo de Q20 (fase vapor)*

$$Q20 = n(Cpmezcla * \Delta T + \lambda mezcla)$$

$$Cp = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$CPmezcla = \sum X * Cp$$

$$\lambda mezcla = \sum X * \lambda$$

- *Despeje de Qequipo*

$$Qequipo = Q19 - Q20 + Q21$$

En esta sección es importante mencionar que cuando la pérdida de calor es positiva, se libera calor en los equipos, y cuando la pérdida de calor es negativa, se suministra calor a los equipos.

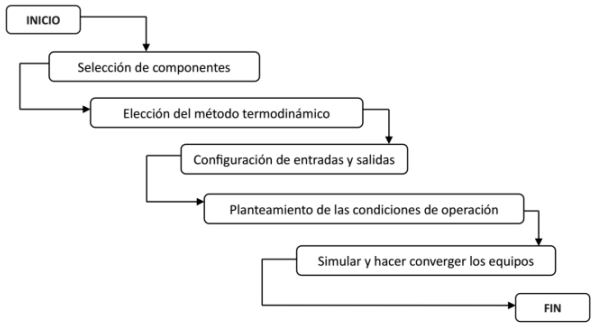


Figura 8. Etapas del proceso de simulación

Simulación del proceso en DWSIM

En términos generales, los objetivos de un software de simulación de procesos son: resolver ecuaciones relativas a la materia prima y los recursos energéticos para todas las operaciones y procesos unitarios involucrados en el proceso, calcular las características de los flujos en cada punto del proceso, suministrar los datos necesarios para realizar cálculos completos para todos los sistemas, estimar costos y, si es posible, optimizar las condiciones de operación del proceso (Chinchay, 2022).

La simulación comprende tres etapas principales:

1. Elección de los compuestos
2. Elección del modelo termodinámico
3. Implementación operativa de los módulos

Los modelos termodinámicos son desarrollos matemáticos que permiten evaluar el comportamiento termodinámico de una sustancia pura o de una mezcla bajo condiciones dadas como presión, temperatura y polaridad. Para una selección adecuada del modelo termodinámico, en este estudio se empleó el método del diagrama de decisión en función de las propiedades de los componentes (Kontogeorgis, 2009), el análisis de componentes derivó en el modelo NRTL (por sus siglas en inglés de non-random two-liquid model).

La implementación de los módulos para esta simulación se puede resumir en cinco etapas que son presentadas en la **Figura 8**.

En este contexto, DWSIM es un simulador operado en estado estacionario modular secuencial y es compatible con CAPEOPEN y puede ser utilizado en sistemas operativos como Windows, Linux, Android, macOS y iOS. Este simulador da la oportunidad a estudiantes de ingeniería química e incluso a profesionales en el campo de la ingeniería de llevar a cabo la modelación de plantas industriales donde involucren procesos químicos empleando modelos termodinámicos y operaciones unitarias altamente precisos.

Una de las herramientas también a recalcar es que le es posible al usuario inspeccionar los cálculos en el código durante la ejecución por el hecho de ser gratuita y sin restricciones (Herrera, 2021). El diagrama del proceso de producción de clorobencenos realizado en DWSIM se presenta en las **Figuras IC-3**, **IC-4** e **IC-5** de la sección de Información Complementaria: https://1drv.ms/f/c/fdd3d651627e2fd2/EiCyQ6IWx-pKll109C0zR88BDbx4q7lHV8ZhMOTYDQgqCg).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se aborda principalmente la optimización del proceso analizando las variables clave para considerar el mejor escenario, además de discutir los resultados obtenidos, destacando las mejoras potenciales en términos de consumo energético y sostenibilidad del proceso, así como las limitaciones y desafíos que podrían surgir en su implementación práctica.

Los resultados obtenidos de los balances de materia y energía (**Tablas IC-1** e **IC-2**) permiten evaluar el comportamiento del sistema bajo las condiciones de entrada establecidas, así como identificar posibles desviaciones respecto a los valores teóricos o esperados.

Los balances contienen los flujos molares y másicos de las distintas corrientes que corresponden al proceso de producción, además de sus características principales. Estas corrientes se detallan para el estado de operación normal de la planta, es decir, en estado estacionario. Todo ello permite configurar el balance de materia del proceso general y de cada área o sistema, comprobando que la producción de MCB y DCB es la deseada.

Análisis de los resultados del modelo

Una vez que se finaliza la simulación donde todos los equipos convergen de forma satisfactoria se genera una tabla de propiedades en la que el usuario puede seleccionar las de interés, en este caso, se tomaron en cuenta las siguientes:

- Temperatura
- Presión

- Flujo másico
- Flujo molar
- Flujo volumétrico
- Fracción molar de la mezcla
- Fracción másica de la mezcla
- Flujo molar de la mezcla
- Flujo másico de la mezcla

De esta manera, al considerar esas propiedades podemos hacer una comparación entre los cálculos realizados manualmente y los generados en el simulador para confirmar que los resultados sean correctos y se cumple con las especificaciones de salida de los productos de interés.

Las especificaciones de los productos fueron:

- Monoclorobenceno (MCB): 99.7% peso
- Diclorobenceno (DCB): 99.6% peso
- HCl (gaseoso): menos de 250 ppm

Considerando una producción total anual de 20000 toneladas de MCB y 2000 toneladas de DCB, fueron comparados los cálculos manuales con los obtenidos en la simulación cumpliendo con los parámetros solicitados (ver **Tablas IC-3** e **IC-4** de la sección de Información Complementaria: https://1drv.ms/f/c/fdd3d651627e2fd2/EiCyQ6IWx-pKll109C0zR88BDbx4q7lHV8ZhMOTYDQgqCg).

La torre de clorobencenos (**Figura 9**) está conformada por la corriente 28 que contiene MCB con un mayor margen de selectividad que DCB y la corriente 29 que contiene DCB en mayor proporción que MCB. En las **Figuras 10** y **11** se presentan las cantidades requeridas de cada producto.

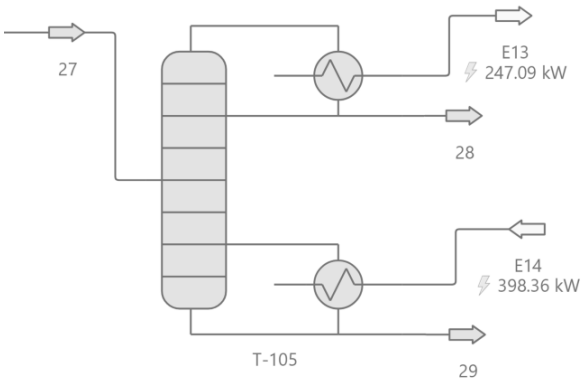


Figura 9. Torre de clorobencenos (T-105) en DWSIM

Como se observa en las **Figuras 10** y **11**, se cumplió con el objetivo de simulación al producir las cantidades esperadas; el simulador toma los valores de conversión de unidades completos; es por esa razón que los resultados de DWSIM son aún más precisos.

28
Material Stream

Temperatura	405.323 K
Presión	1.01325 bar
Flujo másico	2631.26 kg/h
Flujo molar	23.3604 kmol/h
Flujo volumétrico	35.7659 m3/h
Entalpía molar (mezcla)	-22229.8 kJ/kmol
Entropía molar (mezcla)	-49.8398 kJ/[kmol.K]
Fracción molar (vapor)	0.0427395
Fases	V+L
Flujo de energía	186.852 kW

28
Compound Amounts - Basis: Fracción

Compuestos / Fases	Overall
Benzene	0
Chlorine	2.1574407E-17
Water	0
Monochlorobenzene	0.9977155
P-dichlorobenzene	0.0022986
Hydrogen chloride	0
Sodium Hydroxide	0
Sodium Chloride	0
Fracción Total	

Figura 10. Resultados de simulación para la corriente 28 de MCB

29
Material Stream

Temperatura	446.901 K
Presión	1.01325 bar
Flujo másico	268.178 kg/h
Flujo molar	1.82688 kmol/h
Flujo volumétrico	0.525182 m3/h
Entalpía molar (mezcla)	-19377.4 kJ/kmol
Entropía molar (mezcla)	-33.5367 kJ/[kmol.K]
Fracción molar (vapor)	0.00421135
Fases	V+L
Flujo de energía	1.65824 kW

29
Compound Amounts - Basis: Fracción

Compuestos / Fases	Overall
Benzene	0
Chlorine	2.9339011E-30
Water	0
Monochlorobenzene	0.005218
P-dichlorobenzene	0.99460165
Hydrogen chloride	0
Sodium Hydroxide	0
Sodium Chloride	0
Fracción Total	

Figura 11. Resultados de simulación para la corriente 29 de DCB

Una vez concluida la simulación, se analizan los equipos clave para el aprovechamiento de la energía residual, así como los equipos que requieren un valor cercano para poder conectar la recirculación. Es decir, si el equipo T-102 tiene un flujo de energía residual de 2.0 kW y el flujo de energía de alimentación requerido para el calentador C-102 es de 1.5 kW, se define la conexión de recuperación analizando aquellos equipos que requieran de un mayor consumo energético, los cuales se muestran en las **Figuras 12** y **9**.

Para hacer posible la recuperación energética, se debe conectar el flujo de energía E4 del equipo R-101 (**Figura 12**) hacia el rehervidor del equipo T-105 (**Figura 9**) reemplazando el flujo de energía E14.

Una vez implementadas todas aquellas conexiones de recuperación energética, podemos realizar un análisis de la corriente de energía reciclada. En la **Figura IC-6** (de la sección de Información Complementaria: https://1drv.ms/f/c/fdd3d651627e2fd2/EiCyQ6IWx-pKll109C0zR88BDbx4q7lHV8ZhMOTYDQgqCg) se encuentra la resolución de la reconexión del flujo de energía E4 donde se puede observar que la alimentación requerida por el equipo fue redirigida y aprovechada.

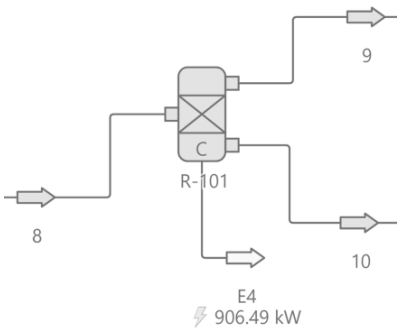


Figura 12. Equipo R-101 que libera energía

En cuanto a la optimización, al analizar las figuras presentadas con anterioridad se pueden comparar los diagramas pre y post optimización y de esta manera podemos destacar que la herramienta de simulación redirigió la energía residual a la corriente designada en la que se podía aprovechar. A continuación, se muestra la **Tabla 1** con los equipos mencionados.

Tabla 1. Resultados del aprovechamiento energético

Equipo generador de energía	Energía residual	Equipo receptor de energía	Energía requerida del equipo	Ahorro de Energía
R-101	906.46 kW	T-104 (Re-hervidor)	398.36 kW	508.1 kW

De acuerdo con los resultados anteriores, se obtiene un valor del 56.05% de energía aprovechada, lo que ayuda considerablemente a reducir los costos de energía y mantenimiento de los equipos y de esta manera reflejaría una mayor competitividad en el mercado. Así mismo, la eficiencia energética disminuye tiempos de inactividad, reduciendo defectos y mejorando la calidad del producto final.

Discusión de los resultados del modelo

La simulación del proceso de producción de monoclorobenceno (MCB) y diclorobenceno (DCB) mediante la cloración directa de benceno se llevó a cabo a través del modelo NRTL debido a la proximidad de los componentes polares y las mezclas de fluidos concebibles de composición caracterizada entre dos o más compuestos químicos que hierven a una temperatura constante y que continúan unidos como si estuvieran formados por un solo componente, además por la proximidad de dos fluidos en algunas etapas del método.

Al iniciar con la simulación, el programa requirió de configuraciones como la elección de los componentes y del sistema de unidades que fueron seleccionadas de acuerdo con las especificaciones del proceso; sin embargo, no hubo limitaciones en cuanto a la elección de los componentes, ya que todos se encontraban disponibles en la base de datos del simulador.

Una vez terminada la simulación, se implementaron las estrategias de optimización, analizando las corrientes energéticas residuales de salida que podían ser aprovechadas dentro del mismo proceso. La **Tabla 1** refleja una estrategia de recuperación de energía en el proceso, mostrando cómo la energía residual de algunos equipos es reutilizada por otros, lo que contribuye a mejorar la eficiencia energética del sistema. De esta manera al ejecutar la recuperación energética al proceso, disminuye la necesidad de consumir energía adicional de fuentes externas, lo que reduce significativamente costos de operación, además de aumentar la eficiencia global de la planta y contribuir a un desarrollo industrial más sostenible y competitivo.

4. CONCLUSIONES

Este estudio presenta los resultados de una simulación por computadora para la producción de clorobencenos mediante la cloración directa de benceno en una línea de reactores de conversión y su posterior purificación en una columna de destilación de benceno.

El modelado se llevó a cabo considerando que el proceso se encuentra en estado estacionario. Para la sección de cloración se consideró un reactor de conversión con el fin de maximizar la selectividad de la reacción, obteniéndose una conversión de 93.0125%. En cuanto a la etapa de purificación, se llevó a cabo en una columna de destilación considerando las fracciones molares del componente pesado en el destilado y el componente ligero en la corriente de fondos.

El diseño presentado en este trabajo resulta ser altamente sensible a los cambios debido a la cantidad de interacciones necesarias en cada uno de los dispositivos necesarios para estimar los resultados de la simulación. A continuación, se presentan las principales conclusiones obtenidas en este trabajo.

1. A partir de la descripción del proceso, se desarrolló la representación gráfica del Diagrama de Flujo de Procesos y el Diagrama de Bloques de Proceso con la herramienta Draw.io, lo que permitió visualizar de manera clara y precisa cada una de las etapas, flujos de materiales y energía, facilitando la comprensión y el análisis del proceso.

2. La validación del modelo de simulación se centra entre una comparativa de los cálculos manuales del balance de materia y los generados en la simulación, demostrando la congruencia entre ambos con un margen de error muy corto, el cuál puede ser explicado por la naturaleza del modelo empleado para la simulación y el número de decimales considerados en el balance de materia realizado manualmente. Por estas razones, se puede afirmar que los datos generados son confiables y que el diseño podría aplicarse en una planta real o llevarse a cabo en una planta piloto.

3. El uso de un software de licencia abierta para modelar procesos representa una enorme ventaja, debido a que es posible comunicarse con el desarrollador del sistema por alguna falla del programa; por otro lado, al igual que los softwares comerciales posee una colección de componentes con sus respectivas propiedades y paquetes termodinámicos apropiados para todo tipo de sistemas. El modelado del proceso se llevó a cabo en el software DWSIM, debido a las características que presenta el programa para la realización del proyecto, utilizando el modelo termodinámico NRTL, ya que era el más adecuado con respecto a la naturaleza de los componentes. El diseño se centró en siete equipos principales: dos reactores de conversión, en donde se lleva a cabo la cloración de benceno para la producción de MCB y DCB; una torre absorbedora encargada de eliminar las impurezas del ácido clorhídrico; un lavador, utilizado para eliminar todo el ácido clorhídrico disuelto aun en la corriente de productos; tres columnas de destilación, la primera encargada de recuperar el benceno no reaccionado, la segunda encargada de eliminar el agua de la corriente de benceno y finalmente la última columna que permite la separación de monoclorobenceno y diclorobenceno. Estos equipos se encuentran conectados con condensadores, intercambiadores de calor, divisores de flujo o mezcladores, para adaptar los flujos a las condiciones apropiadas para cada equipo.

4. La optimización desde el punto de vista energético representa una estrategia clave para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas actuales. Al ser implementadas las estrategias de recuperación de energía en la simulación, se reduce el consumo energético sin dejar de lado el rendimiento y de esta manera no solo se obtendrá una disminución de los costos operativos, sino también una contribución significativa a la conservación del medio ambiente, además de garantizar la viabilidad a largo plazo. Se obtuvo un aprovechamiento del 56.05% en los equipos involucrados.

REFERENCIAS

Brahushi, F., Kengara, F. O., JIANG, X., MUNCH, J. C., & WANG, F. (2017). Fate processes of chlorobenzenes in soil and potential remediation strategies: a review. Pedosphere, 27(3), 407-420.

Chinchay Chinchay, D. (2022). Simulación del proceso de obtención de whisky artesanal de maíz (Zea Mays) utilizando el software DWSIM, Huarmaca, 2021.

Dimian, A. C., Bildea, C. S., & Kiss, A. A. (2014). Integrated design and simulation of chemical processes (Vol. 13). Elsevier.

Elvers, B. (1991). Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry (Vol. 17, pp. 363-376). Hoboken, NJ: Verlag Chemie.

Herrera Guailla, J. A. (2021). Simulación de un proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de palma mediante el software DWSIM.

Kontogeorgis, G. M., & Folas, G. K. (2009). Thermodynamic models for industrial applications: from classical and advanced mixing rules to association theories. John Wiley & Sons.

McCabe, W. L., & Smith, J. C. (2016). Operaciones básicas de ingeniería química Volumen 1. Reverté.

National Center for Biotechnology Information (2025). PubChem Compound Summary for CID 7964, Chlorobenzene. Retrieved May 31, 2025 from https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Chlorobenzene.

Pérez, D. J. N., Díaz, J. C. M., & Barrientos, P. A. S. (2022). Emergency remote teaching in process simulation using DWSIM: a case study from DIQ-UMAG, Chilean Patagonia: Enseñanza remota de emergencia en simulación de procesos con DWSIM: un caso estudio DIQ-UMAG, Patagonia Chilena. Scientia et Technica, 27(2), 130-140.

Tamaño del mercado de clorobenceno | Mordor Intelligence. (n.d.). https://www.mordorintelligence.ar/industry-reports/chlorobenzene-market

Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. (2000). In Wiley eBooks. https://doi.org/10.1002/14356007

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Sustainable development: an analysis of global initiatives for access to STEM education in developing countries

Arellano-Becerril, Enrique

**Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana, B.C, México; (e-mail: enrique.arellano@uabc.edu.mx).*

Abstract: Access to higher education in developing countries continues to be a structural challenge that limits opportunities for technical and vocational training, especially in strategic areas such as science, technology, engineering, mathematics (STEM), and information and communication technologies (ICT). The objective of this study is to identify and analyze global educational support and financing initiatives that contribute to the achievement of target 4.b of Sustainable Development Goal 4 (SDG 4), which focuses on increasing scholarships for students from developing countries. The methodology employed was a systematic documentary and bibliometric review, guided by the PRISMA protocol, based on academic sources. Relevant studies and programs were identified, including scholarships from UNESCO, AFS Global STEM Academies, DAAD, MPOWER Financing, and the British Council. The results demonstrate a range of programs focused on STEM and digital skills training, with inclusive and sustainable approaches. However, challenges persist in terms of coverage, coordination with national policies, and impact assessment. It is concluded that strengthening these initiatives, along with greater international cooperation and integrated public policies, is key to ensuring quality education and reducing access gaps in vulnerable contexts.

Keywords: SDG 4, Education, Scholarships, STEM, ICT

1. INTRODUCCION

En 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, un ambicioso plan de acción global que establece 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y 169 metas específicas, con el propósito de erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad para todos hacia el año 2030 (ONU, 2019). Esta agenda representa un compromiso colectivo de los Estados Miembros para enfrentar los desafíos más apremiantes de la humanidad, promoviendo un desarrollo equilibrado en sus dimensiones económica, social y ambiental (Camarán et al., 2019).

Los ODS son universales, integradores e interdependientes, lo que implica que su cumplimiento requiere de la colaboración entre gobiernos, sociedad civil, sector privado y academia. Hoy en día, las universidades son responsables de promover y avanzar los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible incluidos en la Agenda 2030 (Aversano, 2026). En este contexto, la educación, la innovación tecnológica, la equidad de género y la sostenibilidad ambiental se posicionan como pilares fundamentales para lograr un desarrollo inclusivo y resiliente (PNUD, 2024). La implementación efectiva de los ODS demanda no solo recursos financieros, sino también conocimiento científico, voluntad política y participación ciudadana activa.

La investigación académica desempeña un papel clave en este proceso, al generar evidencia, evaluar políticas públicas y proponer soluciones innovadoras. La innovación es un nodo central que vincula las soluciones tecnológicas y organizacionales con los marcos de sostenibilidad (Vera et al., 2025). Este artículo se enmarca en dicho esfuerzo, abordando una de las metas del ODS 4, centrada en ampliar el acceso a oportunidades educativas para estudiantes de países en desarrollo, especialmente en programas de formación técnica, científica y tecnológica, como estrategia para reducir desigualdades y fortalecer las capacidades locales.

El Objetivo de Desarrollo Sostenible 4 (ODS 4) busca garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad, y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos. Este objetivo reconoce que la educación es un derecho humano fundamental y un motor esencial para el desarrollo sostenible, la reducción de desigualdades y la promoción de sociedades más justas (Pacto Mundial ONU, 2025). Sin embargo, a pesar de los avances logrados, persisten importantes desafíos, especialmente en los países menos

adelantados, donde millones de personas aún carecen de acceso a una educación de calidad.

Una de las metas clave del ODS 4 (meta 4.b) establece la necesidad de aumentar sustancialmente el número de becas disponibles para estudiantes de países en desarrollo, con el fin de facilitar su acceso a programas de enseñanza superior, incluidos programas técnicos, científicos, de ingeniería y de tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Esta meta responde a la creciente demanda de competencias especializadas en un mundo cada vez más digitalizado y globalizado, donde la educación superior se convierte en un factor determinante para la movilidad social y el desarrollo económico. Una de las metas clave del ODS 4 (meta 4.b) establece la necesidad de aumentar sustancialmente el número de becas disponibles para estudiantes de países en desarrollo, con el fin de facilitar su acceso a programas de enseñanza superior, incluidos programas técnicos, científicos, de ingeniería y de tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Esta meta responde a la creciente demanda de competencias especializadas en un mundo cada vez más digitalizado y globalizado, donde la educación superior se convierte en un factor determinante para la movilidad social y el desarrollo económico. Un número creciente de investigaciones empíricas muestra que la inversión en educación en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) genera beneficios económicos y de desarrollo mensurables (Sarpong & Wube, 2025).

No obstante, los estudiantes de regiones con menores niveles de desarrollo enfrentan múltiples barreras estructurales: limitaciones económicas, falta de infraestructura educativa, escasa oferta académica pertinente y brechas digitales. Ampliar el acceso a becas y programas de formación superior no solo representa una cuestión de equidad, sino también una estrategia clave para empoderar a las comunidades, fortalecer el capital humano y fomentar la innovación local. Este artículo analiza el papel de las becas internacionales como instrumento de justicia educativa y propone recomendaciones para mejorar su alcance e impacto en los países en desarrollo. La educación STEM es vital para la prosperidad global a largo plazo (Deehan et al., 2025)

1.1. Planteamiento del problema

A pesar de los compromisos internacionales asumidos en el marco de la Agenda 2030, millones de jóvenes en países en desarrollo, y especialmente en los países menos adelantados, continúan enfrentando barreras estructurales que limitan su acceso a la educación superior. La falta de recursos económicos, la escasa oferta de programas pertinentes, la débil infraestructura tecnológica y la limitada disponibilidad de becas y apoyos financieros, perpetúan ciclos de desigualdad y exclusión educativa. Esta situación es particularmente crítica en áreas estratégicas como la ciencia, la tecnología, la ingeniería y las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), donde la demanda global de talento calificado crece de forma acelerada. La ingeniería es a menudo como una fuerza impulsora del progreso y la innovación.(Gebeshuber & Doyle-Kent, 2024). Otro desafio es que la participación de las mujeres en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) sigue estando significativamente por debajo de la de los hombres en la mayoría de los países (Clemons, 2025)

La insuficiencia de mecanismos de financiamiento y cooperación internacional limita las posibilidades de formación avanzada para estudiantes con alto potencial académico, afectando no solo su desarrollo personal, sino también la capacidad de innovación y crecimiento sostenible de sus comunidades. En este contexto, resulta urgente analizar y fortalecer las iniciativas globales de apoyo educativo que permitan ampliar el acceso equitativo a la educación superior como vía para cumplir con la meta 4.b del ODS 4.

1.2 Objetivos del estudio

Objetivo general:

Analizar estrategias de fortalecimiento para las iniciativas globales de apoyo educativo y financiamiento dirigidas a estudiantes de países en desarrollo, con el fin de ampliar su acceso a programas de enseñanza superior en áreas técnicas, científicas, de ingeniería y TIC, en el marco de la meta 4.b del ODS 4.

Objetivos específicos:

Identificar las principales iniciativas internacionales de becas y financiamiento educativo orientadas a estudiantes de países en desarrollo.

Contribuir al debate académico sobre el papel de la educación superior como motor del desarrollo sostenible en contextos de vulnerabilidad.

A continuación, se enlistan algunos de los programas de formación profesional y técnica en áreas científicas, tecnológicas, de ingeniería y TIC con mayor demanda a nivel mundial (Tabla 1).

Tabla 1. Programas de formación profesional y técnica en áreas científicas, tecnológicas, de ingeniería y TIC con alta demanda a nivel mundial

Programa	Perfil
1. Ciberseguridad y Seguridad de la Información	- Perfil: Técnicos en protección de redes, análisis de vulnerabilidades, respuesta a incidentes. -Nivel: Técnico superior, certificaciones profesionales (CompTIA, CISSP, CEH).
2. Desarrollo de Software y Programación	Perfil: Programadores, desarrolladores web y móviles, testers de calidad (QA). - Lenguajes clave: Python, JavaScript, Java, SQL.
3. Análisis de Datos y Big Data	- Perfil: Técnicos en análisis de datos, visualización, minería de datos. - Herramientas comunes: Excel avanzado, Power BI, SQL, R, Python.

4. Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático	- Perfil: Técnicos en IA aplicada, asistentes de investigación, operadores de sistemas inteligentes. - Ámbitos: Industria 4.0, salud digital, servicios financieros, ciudades inteligentes.
5. Robótica y Automatización Industrial	- Perfil: Técnicos en mecatrónica, mantenimiento de robots, integración de sistemas automatizados. - Sectores: Manufactura, automotriz, logística, agricultura de precisión.
6. Ingeniería en Energías Renovables	- Perfil: Técnicos en instalación y mantenimiento de sistemas solares, eólicos y térmicos. - Demanda: Alta en países con transición energética y políticas de sostenibilidad
7. Diseño y Manufactura Digital (Impresión 3D, CAD/CAM)	- Perfil: Técnicos en diseño asistido por computadora, prototipado rápido, fabricación aditiva. - Aplicación: Industria, salud, arquitectura, educación técnica.
8. Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC)	- Perfil: Soporte técnico, redes, telecomunicaciones, cloud computing. - Certificaciones clave: Cisco (CCNA), Microsoft, AWS, Google Cloud.
9. Diseño de Productos Sostenibles	- Perfil: Técnicos en diseño industrial con enfoque ecológico, materiales reciclables, eficiencia energética. - Tendencia: Alta demanda por innovación verde y economía circular
10. Mantenimiento de Sistemas Electrónicos y Automatizados	- Perfil: Técnicos en electrónica, sensores, PLCs, sistemas embebidos. - Sectores: Transporte, energía, manufactura, salud.

2. METODOLOGIA

Este estudio se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de tipo exploratorio, sustentado en dos estrategias metodológicas complementarias: la revisión documental y la revisión bibliométrica sistemática, con el objetivo de identificar, analizar y sintetizar las principales iniciativas globales de apoyo educativo y financiamiento dirigidas a estudiantes de países en desarrollo, en el marco de la meta 4.b del ODS 4.

2.1 Revisión documental

La revisión documental consistió en el análisis de fuentes primarias y secundarias provenientes de organismos internacionales (UNESCO, ONU, Banco Mundial, OEA, AMEXCID, OEI, entre otros), así como informes técnicos, políticas públicas, bases de datos institucionales y literatura académica relacionada con programas de becas, movilidad académica y cooperación internacional en educación superior. Esta revisión permitió contextualizar el problema, identificar buenas prácticas y establecer criterios de análisis comparativo entre las distintas iniciativas.

Revisión bibliométrica con método PRISMA

La revisión bibliométrica se realizó siguiendo el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que garantiza la transparencia, exhaustividad y reproducibilidad del proceso de revisión sistemática. Se utilizaron bases de datos académicas como EBSCO y Elsevier, aplicando criterios de inclusión como:

Publicaciones entre 2015 y 2025.

Idiomas: español e inglés.

Palabras clave: "ODS 4", "educación superior", "becas internacionales", "países en desarrollo", "formación técnica y profesional", "PRISMA review education".

El proceso incluyó cuatro fases: identificación, cribado, elegibilidad e inclusión. Se utilizó un diagrama de flujo PRISMA para documentar el número de registros identificados, seleccionados y excluidos, así como las razones de exclusión. Los artículos seleccionados fueron analizados mediante técnicas de análisis de contenido y categorización temática, lo que permitió identificar tendencias, vacíos de investigación y enfoques predominantes en la literatura.

Esta metodología permitió construir un marco analítico robusto para evaluar el impacto de las iniciativas existentes y formular recomendaciones de política pública orientadas a fortalecer el acceso equitativo a la educación superior en contextos de vulnerabilidad.

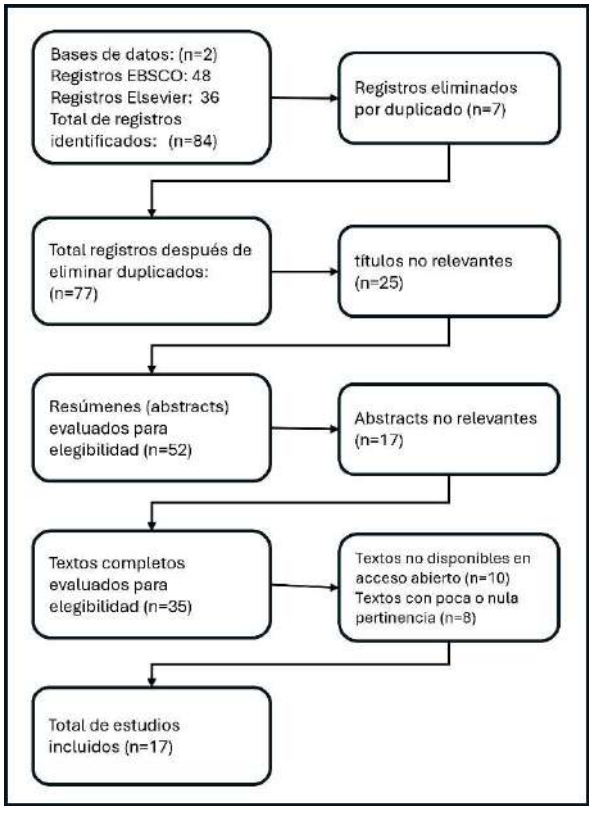


Figura 1. Método PRISMA

Este diagrama (Figura 1) ilustra las cuatro fases del método PRISMA:

Identificación: Se localizaron 84 registros en bases de datos académicas.

Cribado: Tras eliminar duplicados, se examinaron 77 registros, de los cuales 25 fueron excluidos por no cumplir con los criterios de inclusión.

Elegibilidad: Se evaluaron 35 artículos en texto completo, excluyendo 18 por falta de pertinencia o calidad metodológica.

Inclusión: Finalmente, se incluyeron 17 estudios.

4. RESULTADOS

Marco de análisis y propuestas de política pública: iniciativas globales para el acceso equitativo a la educación superior

El cumplimiento de la meta 4.b del Objetivo de Desarrollo Sostenible 4 (ODS 4), que busca aumentar sustancialmente las oportunidades de becas para estudiantes de países en desarrollo, requiere de políticas públicas integrales y de la articulación de esfuerzos multilaterales. Diversas iniciativas internacionales han demostrado ser instrumentos efectivos para reducir las barreras estructurales que enfrentan los estudiantes de contextos vulnerables al acceder a programas de enseñanza superior, particularmente en áreas técnicas, científicas y tecnológicas.

Entre estas iniciativas destaca el Programa de Becas de la UNESCO, que en colaboración con gobiernos como China, Polonia y Japón, ofrece oportunidades de formación en ingeniería, TIC y ciencias aplicadas (Berkovski & Gottschalk, 1997). Estas becas no solo promueven la movilidad académica, sino que también fortalecen las capacidades locales mediante la transferencia de conocimiento y tecnología (UNESCO, 2024).

Asimismo, la Organización de Estados Americanos (OEA) ha consolidado un programa de becas que prioriza la formación de capital humano en áreas estratégicas para el desarrollo regional, como la ingeniería, la educación y la innovación tecnológica. Este enfoque regional permite adaptar las ofertas educativas a las necesidades específicas de los países miembros.

El Banco Mundial, por su parte, ha financiado proyectos educativos en más de 90 países, con énfasis en el fortalecimiento de la educación técnica y profesional. Sus programas promueven la equidad en el acceso a la educación superior mediante inversiones en infraestructura, conectividad digital y formación docente.

En el ámbito latinoamericano, la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID) y la Organización de Estados Iberoamericanos (OEI) han impulsado programas de movilidad académica y becas de posgrado que permiten a estudiantes de la región acceder a formación avanzada en áreas de alta demanda.

Estas iniciativas constituyen referentes clave para el diseño de políticas públicas que busquen ampliar el acceso a la educación superior en países en desarrollo. Su replicabilidad y escalabilidad dependen, sin embargo, de una mayor inversión pública y privada, así como de marcos normativos que garanticen la sostenibilidad y equidad de estos programas. En este sentido, se propone fortalecer los mecanismos de cooperación internacional, fomentar alianzas entre universidades y organismos multilaterales, y establecer sistemas de seguimiento y evaluación que aseguren el impacto de las becas en el desarrollo de capacidades locales.

Tabla 2. Programas de iniciativas globales para el apoyo y financiamiento para estudiantes de países en desarrollo para formación en áreas STEM

Programa	Alcance
1. AFS Global STEM Academies (con apoyo de BP) (AFS, 2025)	Dirigido a: Jóvenes de 15 a 17 años y medio. Áreas: STEM y sostenibilidad. Enfoque: Desarrollo de competencias globales, innovación social y liderazgo juvenil.
2. Academias STEM – AFS México y BP	Dirigido a: Estudiantes de nivel medio superior en México. Áreas: Ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas. Enfoque: Educación STEM, sostenibilidad y competencias interculturales.
3. UNESCO Fellowships Programme (UNESCO, 2025)	Dirigido a: Estudiantes e investigadores de países en desarrollo. Áreas: Ciencias naturales, ingeniería, TIC, educación, cultura.
4. DAAD – Becas para Maestrías en Áreas STEM	Dirigido a: Estudiantes de Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Áreas: Ciencias, ingeniería, informática, matemáticas. Cobertura: Financiamiento completo para estudios de maestría en Alemania
5. MPOWER Financing – Becas STEM para estudiantes internacionales	Dirigido a: Estudiantes internacionales en programas STEM. Áreas: Ciencia, tecnología, ingeniería, matemáticas.
6. British Council – Becas Mujeres en STEM	Dirigido a: Mujeres de países en desarrollo.

	Áreas: STEM. Objetivo: Reducir la brecha de género en ciencia y tecnología

Algunas medidas de política y cooperación internacional son las siguientes:

El Grupo de Trabajo Interinstitucional de las Naciones Unidas sobre la Financiación para el Desarrollo destaca la necesidad de alianzas entre múltiples actores y la cooperación Sur-Sur para apoyar la CTI (Ciencia, Tecnología e Innovación) en los países en desarrollo (United Nations, 2020).

El Banco Mundial, la UNESCO y la OCDE desempeñan funciones superpuestas pero distintas en la gobernanza de la educación STEM (Elfert & Ydesen, 2023).

Las iniciativas JJ/WBGSP y STEM para el Desarrollo del Banco Mundial demuestran el valor de la mentoría, la integración de la investigación y el fortalecimiento de capacidades a largo plazo (World Bank Group, 2025).

6. DISCUSION

Los resultados anteriores nos llevan a cuestionarnos ¿Por qué están fragmentados los programas de becas enfocados a STEM?. Dentro de algunas posibles razones se considera los siguientes puntos:

Falta de coordinación: Diversos actores (gobiernos, ONG, sector privado) operan de forma aislada.

Criterios de elegibilidad variables: Los requisitos inconsistentes entre los programas generan confusión y obstáculos.

Difusión limitada: Muchos estudiantes desconocen las oportunidades disponibles debido a la escasa difusión.

Enfoque a corto plazo: Algunos programas son piloto o carecen de financiación sostenible.

Sesgos de género y regionales: Los programas pueden favorecer involuntariamente a solicitantes urbanos o masculinos.

Y como propuestas se también se han contemplado estrategias para superar la fragmentación, como las siguientes:

Registro mundial de becas: Una plataforma centralizada y multilingüe que reúne todas las becas relacionadas con STEM para países en desarrollo. Incluye filtros por edad, género, región y campo de estudio.

Alianzas público-privadas (APP): Fomentar la colaboración entre gobiernos, empresas tecnológicas e instituciones educativas para aunar recursos y alinear objetivos.

Marco de solicitud estandarizado: Desarrollar un proceso de solicitud unificado para reducir la carga administrativa y mejorar el acceso.

Extensión comunitaria: Colaborar con escuelas locales, ONG y líderes comunitarios para sensibilizar y apoyar las solicitudes.

Sistemas de Monitoreo y Evaluación: Implementar un seguimiento riguroso de los resultados de las becas para fundamentar las políticas y mejorar el diseño de los programas.

7. CONCLUSIONES

La revisión documental y bibliométrica permitió identificar un total de 17 estudios relevantes que abordan iniciativas de apoyo educativo y financiamiento para estudiantes de países en desarrollo, en el marco de la meta 4.b del ODS 4. Las publicaciones analizadas provienen principalmente de organismos multilaterales, universidades, centros de investigación y revistas científicas indexadas en bases como EBSCO y Elsevier.

Los resultados muestran que las iniciativas más destacadas a nivel global incluyen programas de becas promovidos por la UNESCO, la OEA, el Banco Mundial, AMEXCID y la OEI. Estas iniciativas se concentran en áreas estratégicas como la ingeniería, las ciencias aplicadas, la formación técnica y profesional, y las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Se identificó que la mayoría de los programas priorizan a estudiantes de países de ingresos bajos y medios, con criterios de selección basados en mérito académico, necesidad económica y compromiso con el desarrollo comunitario.

Desde el análisis bibliométrico, se observó un aumento sostenido en la producción científica relacionada con el ODS 4 y la educación superior entre 2015 y 2025, con un énfasis creciente en la equidad, la inclusión y la cooperación internacional. Las palabras clave más frecuentes fueron equidad educativa, movilidad académica, becas internacionales y formación técnica. Asimismo, se identificaron vacíos en la literatura respecto a la evaluación de impacto a largo plazo de estas iniciativas en los contextos locales.

Los hallazgos de este estudio evidencian que, si bien existen múltiples esfuerzos internacionales para ampliar el acceso a la educación superior en países en desarrollo, persisten desafíos significativos en términos de cobertura, sostenibilidad y pertinencia. Las iniciativas analizadas han demostrado ser efectivas en la creación de oportunidades educativas, pero su alcance sigue siendo limitado frente a la magnitud de la demanda global.

Uno de los principales retos identificados es la fragmentación de los programas de becas, que dificulta su articulación con las políticas educativas nacionales y limita su impacto estructural. Además, la falta de seguimiento sistemático y de mecanismos de evaluación impide medir con precisión los efectos de estas iniciativas en el desarrollo de capacidades locales y en la reducción de desigualdades.

En este sentido, se propone avanzar hacia modelos de cooperación internacional más integrados, que vinculen a gobiernos, universidades, organismos multilaterales y sector privado en el diseño de programas de becas alineados con las

necesidades del desarrollo sostenible. Asimismo, se recomienda fortalecer los sistemas de información y evaluación, promover la equidad de género en el acceso a las becas, y garantizar la inclusión de estudiantes de comunidades rurales, indígenas y marginadas.

Finalmente, se destaca la necesidad de que los países en desarrollo no solo sean receptores de ayuda, sino también actores activos en la construcción de alianzas educativas, promoviendo políticas públicas que reconozcan la educación superior como un derecho y una herramienta estratégica para el desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) del Gobierno de México, a través de la beca del Sistema Nacional de Investigadores (SNII), y con fondos provenientes de los programas prioritarios. El contenido de esta publicación es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja necesariamente la postura oficial de las instituciones financiadoras.

REFERENCIAS

AFS. (2025). *AFS Global STEM Academies*. AFS Intercultural Programs.

Aversano, N. (2026). Sustainable Development Goals and Universities: Actions and Disclosure. En V. Ratten (Ed.), *International Encyclopedia of Business Management (First Edition)* (pp. 103–108). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13701-3.00224-3

Berkovski, B., & Gottschalk, C. M. (1997). Strengthening human resources for new and renewable energy technologies of the 21st century: UNESCO Engineering Education and Training Programme. *Renewable Energy*, *10*(2), 441–450. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)00103-6

Camarán, M. L., Barón M., L., & Rueda S., M. P. (2019). La Responsabilidad social empresarial y los objetivos del desarrollo sostenible (ODS). *Teorías, Enfoques y Aplicaciones en las Ciencias Sociales*, *11*(24), 41–52. https://revistas.uclave.org/index.php/teacs/article/view/2206

Clemons, A. (2025). Navigating a house with many rooms: A discipline-based approach to assessing digital scholarship. *The Journal of Academic Librarianship*, *51*(5), 103121. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.acalib.2025.103121

Deehan, J., Redshaw, S., Danaia, L., Postlethwaite, F., Donnelly, A., & Morris, C. (2025). Understanding STEM beyond the cities: A comprehensive review of non-metropolitan STEM education research. *International Journal of Educational Research Open*, *9*, 100496. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijedro.2025.100496

Elfert, M., & Ydesen, C. (2023). UNESCO, the OECD and the World Bank: A Global Governance Perspective. En M. Elfert & C. Ydesen (Eds.), *Global Governance of Education: The Historical and Contemporary Entanglements of UNESCO, the OECD and the World Bank* (pp. 23–50). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40411-5_2

Gebeshuber, I. C., & Doyle-Kent, M. (2024). Innovations and Challenges in Engineering Education for the Future: Contributing to the UN Sustainable Development Goals (SDGs). *IFAC-PapersOnLine*, *58*(3), 134–138. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.139

Sarpong, J., & Wube, B. A. (2025). Empowering STEM education from within: A call for self-reliance in the Global South. *International Journal of Educational Development*, *117*, 103350. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijedudev.2025.103350

UNESCO. (2024). *Reunión Mundial sobre la Educación 2024*.

UNESCO. (2025). *UNESCO Fellowships*.

United Nations. (2020). *International level institutions and mechanisms to strengthen science, technology and innovation*. Department of Economic and Social Affairs Financing for Sustainable Development.

Vera, C. L., Gandía, J. A. G., de Lucas Ancillo, A., & del Val Núñez, M. T. (2025). Innovation and circular economy within the sustainable development goals: A bibliometric and conceptual analysis. *Global Economics Research*, *1*(2), 100011. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecores.2025.100011

World Bank Group. (2025). *World Bank Scholarships Program*. World Bank Scholarships.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Energy analysis of reactive distillation for bioethanol dehydration using simulation in Unisim Design

Diego Rivera-Herrera*, Elsa Hynmar Fernández-Martínez*, Arturo Elías-Domínguez*

**Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Calzada Apizaquito S/N, Apizaco, Tlaxcala, C.P. 90401 México. (Tel.:241-417-05-19; correo electrónico: 20162143@uatx.mx).*

Abstract: Reactive distillation is proposed as an efficient alternative for bioethanol dehydration, as it integrates the reaction and separation into a single unit, reducing equipment and energy consumption. In this work, three reactive distillation configurations reported in the literature were evaluated using simulations in UniSim Design, to analyze their thermodynamic and kinetic behavior, as well as their energy and recovery performance. The NRTL model was used to represent the liquid-vapor equilibrium, and the ethylene oxide hydration reaction was considered. The simulations showed adequate agreement with the expected results and allowed the configurations to be compared under equivalent operating conditions. The analysis demonstrated that all configurations could overcome the limitation of the ethanol-water azeotrope and producing high-purity bioethanol, with one of them standing out for its greater energy efficiency and operational stability. Overall, the results confirm that reactive distillation represents a viable and sustainable option for obtaining anhydrous bioethanol.

Keywords: bioethanol, reactive distillation, energy efficiency, process intensification, simulation in UniSim Design, thermodynamic equilibrium.

1. INTRODUCCIÓN

El bioetanol es un biocombustible renovable que se obtiene principalmente a partir de la fermentación de materias primas ricas en azúcares y almidones como caña de azúcar y maíz, así como de residuos lignocelulósicos mediante hidrólisis enzimática (Kaminski et al., 2008; Singh & Rangaiah, 2017; Frolkova & Raeva, 2010). Su creciente importancia como alternativa a los combustibles fósiles se debe a que puede mezclarse con gasolina, contribuyendo a la reducción de emisiones contaminantes y al avance hacia sistemas energéticos más sostenibles (Jiménez-González et al., 2012). Además, la intensificación de procesos y el diseño de tecnologías más limpias son esenciales para mejorar la viabilidad económica y ambiental del bioetanol (Kiss et al., 2019; Sánchez-Ramírez et al., 2020; Pazmiño-Mayorga et al., 2021).

1.1 Deshidratación mediante métodos convencionales

La purificación tradicional de bioetanol se lleva a cabo en un sistema extractivo de tres columnas convencionales ya que para su aprovechamiento el principal desafío que presenta radica en la etapa de purificación, debido a la formación del azeótropo etanol-agua al 95.6 % en peso, que limita la eficiencia de la destilación convencional (Guzmán-Martínez et al., 2019). Diversas tecnologías, como la destilación extractiva o azeotrópica, han sido propuestas para superar esta limitación; sin embargo, presentan altos consumos energéticos, costos operativos elevados y un impacto ambiental considerable (Harmsen, 2010; Sánchez-Ramírez et al., 2017). Además, estos métodos suelen requerir agentes entrópicos o disolventes que incrementan los riesgos ambientales y operativos (Kiss et al., 2019; Kong et al., 2022).

1.2 Destilación reactiva

La destilación reactiva surge como una alternativa eficiente y sostenible, al integrar en una misma unidad la reacción química y la separación, lo que permite reducir el número de equipos, aprovechar mejor la energía del sistema y disminuir la huella ambiental del proceso (Kiss et al., 2019; Barrientos et al., 2023). En la reacción entre el agua presente en la mezcla etanol-agua y óxidos epoxídicos, como el óxido de etileno (OE) o el óxido de propileno (OP), produce glicoles que facilitan la eliminación del agua y, por ende, la obtención de bioetanol anhidro (Altiokka & Akyalçin, 2009; An et al., 2014). Asimismo, permite reducir aún más el consumo energético y las pérdidas térmicas (Kong et al., 2023; Sánchez-Ramírez et al., 2020). Además de incrementar la eficiencia de separación, contribuye al cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad industrial mediante el uso racional de energía y materias primas (Pazmiño-Mayorga et al., 2021; Kong et al., 2022).

La viabilidad de esta tecnología ha sido ampliamente explorada mediante simulación. Tavan & Hosseini (2013) llevaron a cabo un estudio paramétrico de una columna de destilación reactiva integrada, destacando la intensificación de procesos y los ahorros energéticos potenciales. An et al. (2014) desarrollaron un análisis de una columna convencional de destilación reactiva, validando modelos termodinámicos y cinéticos que sustentan la factibilidad técnica del proceso. Por su parte, Kaymak (2019) propuso un diseño y control de la destilación reactiva para bioetanol, enfocándose en la

estabilidad operativa y la obtención de un destilado de alta pureza.

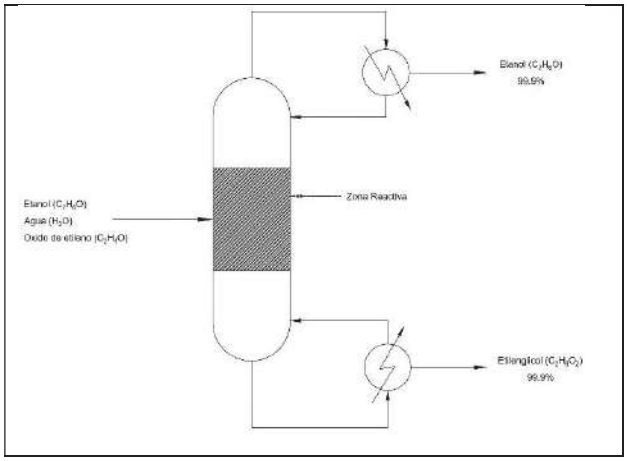


Figura 1. Esquema de una columna de destilación reactiva.

1.3 Enfoque de la investigación

En este trabajo se presenta una evaluación comparativa de tres investigaciones reportadas en la literatura, en las que se emplea la simulación: Tavan & Hosseini (2013), quienes realizan un estudio de destilación reactiva integrada, analizando la influencia de parámetros operativos en la eficiencia energética, An et al. (2014), que validan modelos termodinámicos y cinéticos en una columna de destilación reactiva convencional mediante la comparación de los datos simulados con datos experimentales reportados en bibliografía (Altiokka et al., 2009; Kozlovsky et al., 2002). Demostrando su viabilidad técnica para obtener bioetanol anhidro, y Kaymak (2019), que desarrolla el diseño y control de un proceso de destilación reactiva, destacando la importancia de la estabilidad operativa para asegurar pureza y reducir costos de operación. El análisis permite identificar que los tres enfoques logran superar el azeótropo y alcanzar bioetanol con pureza superior al 99.5 %. Tavan & Hosseini (2013) aportan la ruta más intensificada y con mayor potencial de ahorro energético, An et al. (2014) ofrecen una base sólida para validar la factibilidad técnica del proceso y Kaymak (2019) plantea una estrategia de control que favorece la estabilidad y escalabilidad industrial, lo que impacta en la reducción de costos operativos. Por lo que podemos asumir que la viabilidad económica y energética de la destilación reactiva dependerá de la integración de las tres perspectivas, optimización paramétrica, validación científica y técnica, así como también el control operativo. Este análisis comparativo aporta una visión integral sobre el desarrollo de procesos sostenibles para la producción de bioetanol anhidro.

El presente trabajo se llevó a cabo mediante simulaciones en UniSim Design, con el fin de evaluar cuál resulta más viable desde el punto de vista energético y económico para la deshidratación sostenible de bioetanol. De esta manera, se busca aportar una visión integral que combine la intensificación de procesos, la validación científico-técnica y el control operativo, contribuyendo al diseño de procesos más eficientes y sostenibles para la industria de biocombustibles. (Kong et al., 2022; Pazmiño-Mayorga et al., 2021).

2. METODOLOGÍA

El desarrollo de esta investigación se enfoca en 3 etapas principalmente, estimación del Equilibrio Líquido-Vapor (ELV), la cinética de la reacción de hidratación y la simulación del proceso en estado estacionario, comparándola con datos reportados en Tavan & Hosseini (2013), Kaymak (2019) y An et al. (2014).

2.1 Termodinámica

Para estimar adecuadamente el comportamiento de equilibrio del sistema liquido-vapor, se utiliza el modelo de actividad NRTL (Non-Random Two-Liquid, Ecuación 2), para estimar la fase líquida en sistemas no ideales como el etanol-agua. Se utilizan parámetros obtenidos a partir de datos experimentales para las mezclas binarias (etanol-agua, agua-etilenglicol (EG), etanol-etilenglicol) de (Kamihama et al., 2012) y para las mezclas (óxido de etileno-etilenglicol, óxido de etileno-agua) de (Giessler et al., 1999), mientras que los parámetros para (óxido de etileno-etanol) se toman de la base de datos de Unisim Design, Los parámetros del modelo NRTL y los parámetros de la ecuación de Antoine (Ecuación 1) se emplearán de las mismas referencias citadas anteriormente para poder hacer una comparación con datos de equilibrio disponibles en la literatura. Se generan diagramas de fases por estimación con el modelo NRTL, se compararán con puntos de burbuja obtenidos de Unisim Design y datos reportados en bibliografía para verificar el buen ajuste del modelo a las condiciones del sistema.

$$\log_{10} P_{(k)} = A - \frac{B}{T + C} \tag{1}$$

$$\ln \gamma i = \frac{\sum_j \tau_{ji} G_{ji} x_j}{\sum_k G_{ki} x_k} + \sum_j \frac{x_j G_{ij}}{\sum_k x_k G_{ik}} \left(\tau_{ij} - \frac{\sum_m x_m \tau_{im} G_{im}}{\sum_k x_k G_{ik}}\right) \tag{2}$$

Esta validación es indispensable para garantizar que la simulación del proceso represente correctamente el comportamiento termodinámico en el equilibrio líquido-vapor de las mezclas.

2.2 Cinética de la reacción de hidratación OE

La reacción de hidratación del óxido de etileno con agua, se valida considerando que esta es una reacción conocida y utilizada (Altiokka & Akyalçin, 2009). La hidratación del óxido de etileno consiste en hacerlo reaccionar con agua proveniente de la fermentación para formar etilenglicol, como se muestra en la reacción química de la Ecuación (3).

Se presentan los parámetros cinéticos de la reacción no catalizada según lo proporcionado por Altiokka & Akyalçin, (2009) y An et al. (2014) (Ecuación 4), por Kaymak (2019) (Ecuación 5) y por Tavan & Hosseini (2013) (Ecuación 6).

Tabla 1. Cinética de la reacción de hidratación con OE

$C_2H_4O + H_2O \longrightarrow C_2H_6O_2$	(3)

$r_{OE\left(\frac{mol}{l\times min}\right)} = 8.22\times10^{5}\exp\frac{-8220}{T}\ C_{OE}C_{H_2O}$	(4)
$r_{OE\left(\frac{kmol}{m^3\times s}\right)} = 3.15\times10^{12}\exp\frac{-9547}{T}\ x_{OE}x_{H_2O}$	(5)
$r_{OE\left(\frac{mol}{cm^3\times s}\right)} = 3.15\times10^{9}\exp\frac{-9547}{T}\ x_{OE}x_{H_2O}$	(6)

donde C_2H_4O, H_2O y $C_2H_6O_2$ son las fórmulas químicas del OE, agua y EG respectivamente. r_{OE} representa la velocidad de reacción del OE. La Ecuación 4 está expresada en concentraciones ($C_{OE}C_{H_2O}$), mientras que las Ecuaciones 5 y 6 se describen en términos de composiciones molares ($x_{OE}x_{H_2O}$).

2.3 Simulación en estado estacionario

El proceso se configuró de 3 maneras diferentes, denominándose configuración 1, 2 y 3 (C1, C2 y C3), consideradas de 3 literaturas diferentes. Cada una ajustándose a lo reportado por los autores mencionados, contemplando el número de etapas, etapa de alimentación, etapas reactivas, condiciones de reflujo, así como también todas las variables del proceso, temperatura, presión flujos y composiciones molares (T, P, F, x_i). En la Figura 2 se muestra un esquema de la columna reactiva en el ambiente de simulación de UniSim Design.

Tabla 2. Variables de operación del sistema y especificación de la corriente de alimentación

	C1	C2	C3
Presión (kPa)	101.33	450	600
Temperatura (C)	80-197	80-190	100-190
Flujo mezcla ($EtOH/H_2O$) (kmol/h)	216	40	100
x_{EtOH}	0.84	0.85	0.80
x_{H_2O}	0.16	0.15	0.20

Se agregaron los parámetros binarios necesarios para la correlación de NRTL a Unisim Design los cuales se ocuparon para las 3 configuraciones, sin embargo, los datos cinéticos se modificaron dependiendo a lo reportado por cada autor. Dentro de la simulación se hicieron adecuaciones para una mejor estimación como lo es agregar un mezclador al cual ingresan la corriente de la mezcla azeotrópica y la corriente de OE para obtener una sola corriente, la cual es la alimentación a la columna de destilación reactiva, esto en los casos de Tavan & Hosseini (2013) y An et al. (2014), ya que Kaymak (2019) presenta una configuración en la que la alimentación a la columna es separada, por lo que no fue necesaria esta adecuación.

Tabla 3. Diseño de la columna reactiva para cada configuración

Variable de diseño	C1	C2	C3
N	18	17	20
N_F	2/16	12 / 15	17
Zona reactiva	2-15	12-16	11-17

donde N es el número de etapas en la columna, N_F es la etapa de alimentación de la mezcla azeotrópica. Se compararon los resultados con los reportados por los autores observando que se tiene una correcta estimación y datos similares en cuestión de recuperación y composición molar de etanol anhidro.

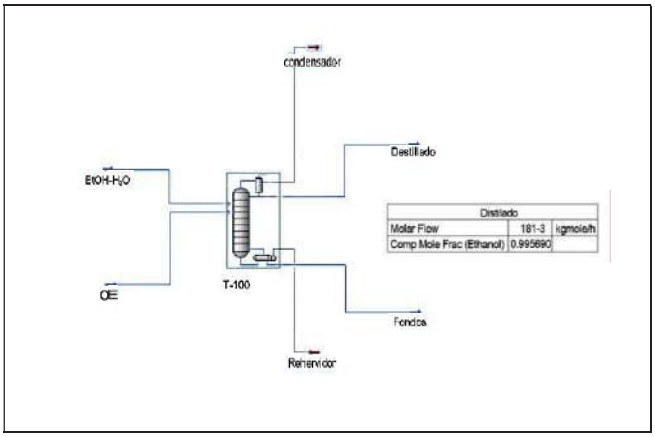


Figura 2. Esquema de la columna reactiva en el ambiente de simulación de UniSim Design.

Una vez obtenidas las tres simulaciones, se igualaron gradualmente los flujos de alimentación. Es importante señalar que en este trabajo no se llevó a cabo una optimización del diseño de cada columna; las configuraciones C1, C2 y C3 se simularon conservando las condiciones originales reportadas por cada autor (número de etapas, ubicación de alimentación, presiones y parámetros cinéticos). De esta manera, la comparación refleja únicamente las diferencias propias del diseño de cada configuración cuando operan bajo un mismo flujo de alimentación, permitiendo evaluar de forma uniforme su desempeño energético y su eficiencia en la recuperación de productos.

Tabla 4. Diseño de la columna reactiva para cada configuración, igualando flujos y composición de alimentación

	C1	C2	C3
Presión (kPa)	101.33	450	600
Temperatura (°C)	80-197	80-190	100-190
F mezcla ($EtOH/H_2O$) (kmol/h)	100	100	100
x_{EtOH}	0.80	0.80	0.80
x_{H_2O}	0.20	0.20	0.20

3. RESULTADOS

Las tres configuraciones de destilación reactiva fueron simuladas en UniSim Design utilizando el modelo termodinámico NRTL con parámetros obtenidos de Kamihama et al. (2012) y Giessler et al. (1999), lo que permitió describir de manera precisa el equilibrio líquido-vapor del sistema etanol-agua-óxido de etileno-etilenglicol. La cinética de reacción se basó en los dados reportados por cada autor para la hidratación del óxido de etileno.

Los resultados mostraron una buena concordancia con los datos de referencia reportados por los autores de cada configuración, confirmando que los modelos empleados permiten una estimación confiable del comportamiento del sistema. Las concentraciones de etanol anhidro obtenidas superaron el 99.5 %, cumpliendo con los objetivos de pureza establecidos.

Al comparar con Tavan & Hosseini (2013) con las mismas configuraciones del proceso, el gasto energético se incrementó en un 56 %, la recuperación disminuyó ligeramente, mientras que la pureza se mantiene.

Tabla 5. Resultados de la simulación para la C1

	Literatura Tavan et al., (2013)	Este trabajo
Consumo energético (MW)	2.5	3.9
% Recuperación	100.0	99.89
Composición molar de bioetanol (%)	99.9	99.96

Al realizar la comparación de los datos obtenidos en este trabajo con lo reportado por Kaymak (2019) se tuvo una disminución del 91 % en el gasto energético, así como también una ligera disminución en la recuperación.

Tabla 6. Resultados de la simulación para la C2

	Literatura Kaymak (2019)	Este trabajo
Consumo energético (MW)	6.2	0.54
% Recuperación	100.0	99.97
% Composición molar de bioetanol	99.9	99.9

Mientras que la comparación de lo obtenido con lo reportado por An et al. (2014) se nota un incremento en el gasto energético y una disminución más notable en la recuperación, así como también en la pureza del etanol anhidro.

Tabla 7. Resultados de la simulación para la C3

	Literatura An et al., (2014)	Este trabajo
Consumo energético (MW)	3.0	5.4
% Recuperación	100.0	99.18
% Composición molar de bioetanol	99.9	99.51

Al igualar los flujos de alimentación a 100 kmol/h de mezcla etanol-agua (80–20) y 20 kmol/h de óxido de etileno, se mantuvieron las condiciones operativas reportadas por cada autor para facilitar una comparación uniforme. Los resultados indican que el proceso de Kaymak (2019) presenta el menor consumo energético (1.07 MW), con una eficiencia de 99.98 % y una pureza de 99.97 % de etanol anhidro.

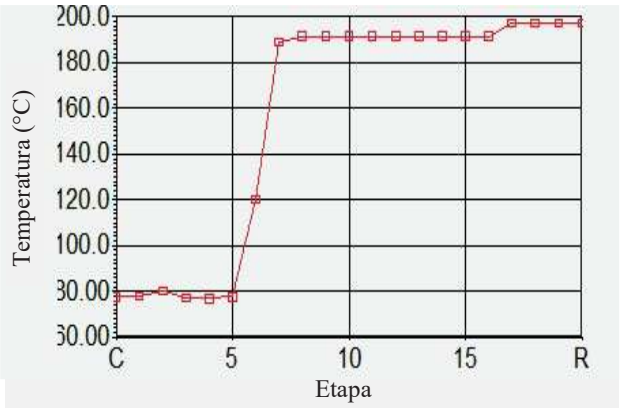


Figura 3. Perfil de temperatura a lo largo de la columna de destilación reactiva para C2 en UniSim Design

El perfil de temperatura a lo largo de la columna de destilación reactiva con la configuración de Kaymak (2019) con un flujo

de 100 kmol/h de mezcla etanol-agua (80–20) y 20 kmol/h de óxido de etileno, que se muestra en la Figura 3, se observa que la temperatura se mantiene elevada a lo largo de casi toda la columna, disminuyendo únicamente en la zona del condensador. Esto indica una efectiva utilización del calor dentro de la columna, manteniendo las condiciones necesarias para la vaporización sin pérdidas significativas. El descenso de temperatura en el condensador evidencia la condensación del vapor superior. Confirmando que la columna opera con alta eficiencia energética, minimizando pérdidas de calor y asegurando un proceso de separación económico y sustentable.

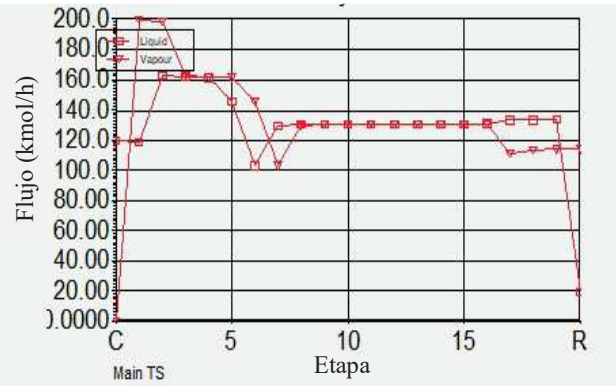


Figura 4. Perfil de flujo de líquido y vapor a lo largo de la columna de destilación reactiva para C2 en UniSim Design.

La Figura 4 muestra el perfil de flujo de líquido y vapor a lo largo de la columna de destilación reactiva con la configuración de Kaymak (2019) con un flujo de 100 kmol/h de mezcla etanol-agua (80–20) y 20 kmol/h de óxido de etileno muestra que los flujos de líquido y vapor se mantienen prácticamente constantes en la mayor parte de la columna, con variaciones solo en las zonas del condensador y el rehervidor. Este comportamiento indica que la operación es estable y equilibrada, donde el intercambio de masa y energía ocurre de manera eficiente. Esto reafirma que la configuración de Kaymak (2019) requiere bajo consumo de energía para llevar a cabo la separación.

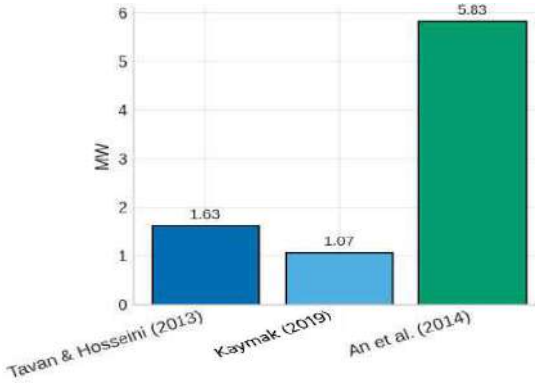


Figura 5. Comparación del consumo energético al igualar flujos y composiciones para todas las configuraciones.

La Figura 5 presenta la comparación del consumo energético de las tres configuraciones de destilación reactiva analizadas, una vez que se igualaron los flujos de alimentación y las composiciones de entrada. En el gráfico se aprecia una diferencia significativa en la demanda energética entre los diseños reportados por Tavan & Hosseini (2013), Kaymak (2019) y An et al. (2014). Teniendo que la configuración de Kaymak (2019) ofrece el mejor desempeño energético y operativo, mientras que la de An et al. (2014) resulta la menos eficiente. Estas diferencias demuestran que el diseño estructural de la columna y la ubicación de la zona reactiva son factores determinantes en el consumo de energía y la sostenibilidad del proceso (Pazmiño-Mayorga et al., 2021; Kong et al., 2023).

Tabla 8. Comparación de consumo energético y eficiencia de separación entre configuraciones al igualar composiciones y flujos de alimentación

	C1	C2	C3
Presión (kPa)	101.33	450	600
Temperatura (C)	80-197	80-190	100-190
F mezcla ($EtOH/H_2O$) (kmol/h)	100	100	100
x_{EtOH}	0.80	0.80	0.80
x_{H_2O}	0.20	0.20	0.20
Consumo energético (MW)	1.627	1.07	5.825
% Recuperación	99.95	99.98	98.56
% Composición molar de bioetanol	99.96	99.97	99.79

El modelo de Tavan & Hosseini (2013) mostró un consumo de 1.63 MW y una pureza de 99.96 %, mientras que el de An et al. (2014) presentó un mayor gasto energético (5.82 MW) y una eficiencia ligeramente inferior (98.56 %).

Estos resultados demuestran que la configuración propuesta por Kaymak (2019) logra un mejor aprovechamiento energético y una elevada eficiencia de recuperación, lo que la convierte en la opción más favorable para la producción sostenible de bioetanol anhidro.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio confirma que la destilación reactiva es una alternativa técnicamente viable y energéticamente eficiente

para la deshidratación de bioetanol, al integrar en una sola unidad los fenómenos de reacción y separación. A partir de las simulaciones realizadas en UniSim Design, utilizando parámetros termodinámicos de Kamihama et al. (2012) y Giessler et al. (1999), y datos cinéticos reportados por Altiokka & Akyalçin (2009) y An et al. (2014), por Kaymak (2019) y por Tavan & Hosseini (2013), se comprobó que los modelos empleados describen adecuadamente el comportamiento del sistema etanol–agua–óxido de etileno–etilenglicol.

Los resultados al comparar las configuraciones reportadas por Tavan & Hosseini (2013), An et al. (2014) y Kaymak (2019) demuestran que todas son capaces de superar el azeótropo etanol-agua y alcanzar purezas superiores al 99.7 % de etanol anhidro. Sin embargo, al igualarse los flujos de alimentación de las tres configuraciones manteniendo las condiciones de operación propias de cada proceso, se observó que la propuesta de Kaymak (2019) es la más eficiente desde el punto de vista energético, con un consumo de 1.07 MW, una eficiencia de recuperación del 99.98 % y una pureza del 99.97 %, por lo que se considera la alternativa más favorable para un escalamiento industrial sostenible.

Este trabajo demuestra que la combinación de un modelado termodinámico preciso, una cinética validada experimentalmente (realizada en la literatura) y un diseño adecuado de la columna permite obtener simulaciones confiables que contribuyen al desarrollo de procesos sostenibles. La destilación reactiva se consolida como una herramienta clave en la intensificación de procesos, con potencial para reducir el consumo energético, los costos operativos y el impacto ambiental en la producción de bioetanol anhidro. Como trabajo futuro se realizará la optimización de los diseños de la columna, considerando como función objetivo la energía de separación del proceso.

REFERENCIAS

Altiokka, M.R. and Akyalçin, S. 2009. Kinetics of the hydration of ethylene oxide in the presence of heterogeneous catalyst. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48(24), pp.10840–10844. https://doi.org/10.1021/ie901037w.

An, W., Lin, Z., Chen, J. and Zhu, J. 2014. Simulation and analysis of a reactive distillation column for removal of water from ethanol-water mixtures. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(14), pp.6056–6064. https://doi.org/10.1021/ie403906z

Barrientos, D.A., Fernandez, B., Morante, R., Rivera, H.R., Simeon, K. and Lopez, E.C.R. 2023. *Recent Advances in Reactive Distillation. Engineering Proceedings*, 56(1). https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15278

Frolkova, A.K. and Raeva, V.M. 2010. Bioethanol dehydration: State of the art. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 44(4), pp.545–556. https://doi.org/10.1134/S0040579510040342

Giessler, S., Danilov, R.Y., Pisarenko, R.Y., Serafimov, L.A., Hasebe, S. and Hashimoto, I. 1999. Feasible separation modes for various reactive distillation systems. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 38(10), pp.4060–4067. https://doi.org/10.1021/ie9900162

Guzmán-Martínez, C.E., Castro-Montoya, A.J. and Nápoles-Rivera, F. 2019. Economic and environmental comparison of bioethanol dehydration processes via simulation: reactive distillation, reactor–separator process and azeotropic distillation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(10), pp.2061–2071. https://doi.org/10.1007/s10098-019-01762-5

Harmsen, J. 2010. Process intensification in the petrochemicals industry: Drivers and hurdles for commercial implementation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(1), pp.70–73. https://doi.org/10.1016/j.cep.2009.11.009

Jiménez-González, C., Constable, D.J.C. and Ponder, C.S. 2012. Evaluating the "Greenness" of chemical processes and products in the pharmaceutical industry—a green metrics primer. *Chemical Society Reviews*, 41(4), pp.1485–1498. https://doi.org/10.1039/c1cs15215g

Kamihama, N., Matsuda, H., Kurihara, K., Tochigi, K. and Oba, S. 2012. Isobaric vapor-liquid equilibria for ethanol + water + ethylene glycol and its constituent three binary systems. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 57(2), pp.339–344. https://doi.org/10.1021/je2008704

Kaminski, W., Marszalek, J. and Ciolkowska, A. 2008. Renewable energy source—Dehydrated ethanol. Chemical Engineering Journal, 135 (1–2), pp.95–102. https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.03.017

Kaymak, D. B. 2019. Design and control of an alternative bioethanol purification process via reactive distillation from fermentation broth. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(4), 1675-1685. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b04832

Kiss, A.A., Jobson, M. and Gao, X. 2019. Reactive Distillation: Stepping Up to the Next Level of Process Intensification. Industrial and Engineering Chemistry Research, 58(15), pp.5909–5918. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b05450

Kong, Z.Y., Sánchez-Ramírez, E., Yang, A., Shen, W., Segovia-Hernández, J.G. and Sunarso, J. 2022. Process intensification from conventional to advanced distillations: Past, present, and future. Chemical Engineering Research and Design, 188, pp.378–392. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.09.056

Kong, Z.Y., Yang, A., Tsai, C.C., Adi, V.S.K., Saptoro, A. and Sunarso, J. 2023. Design and Optimization of Hybrid Reactive-Extractive Distillation for Ternary Azeotropic Separation: A Case Considering the Effect of Side Reactions. Industrial and Engineering Chemistry Research, 62(27), pp.10601–10610. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01532

Kozlovsky, I. A., Kozlovsky, R. A., Koustov, A. V, Makarov, M. G., Suchkov, J. P., & Shvets, V. F. 2002. Kinetics and

Products Distribution of Selective Catalytic Hydration of Ethylene-and Propylene Oxides in Concentrated Aqueous Solutions. https://doi.org/10.1021/op010099

Pazmiño-Mayorga, I., Jobson, M. and Kiss, A.A. 2021. Conceptual design of a dual reactive dividing wall column for downstream processing of lactic acid. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 164. https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108402

Sánchez-Ramírez, E., Alcocer-García, H., Quiroz-Ramírez, J.J., Ramírez-Márquez, C., Segovia-Hernández, J.G., Hernández, S., Errico, M. and Castro-Montoya, A.J. 2017. Control properties of hybrid distillation processes for the separation of biobutanol. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 92(5), pp.959–970. https://doi.org/10.1002/jctb.5020

Sánchez-Ramírez, E., Ramírez-Márquez, C., Quiroz-Ramírez, J.J., Angelina-Martínez, A.Y., Vicente-Cortazar, V. and Segovia-Hernández, J.G. 2020. Design of dividing wall columns involving sustainable indexes for a class of quaternary mixtures. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 148. https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107833

Sánchez-Ramírez, E., Segovia-Hernández, J.G., Lund, N.L., Pinto, T., Udugama, I.A., Junicke, H. and Mansouri, S.S. 2021. Sustainable Purification of Butanol from a Class of Mixtures Produced by Reduction of Volatile Fatty Acids. Industrial and Engineering Chemistry Research, 60(13), pp.4975–4986. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c06164

Singh, A. and Rangaiah, G.P. 2017. Review of Technological Advances in Bioethanol Recovery and Dehydration. Industrial and Engineering Chemistry Research, 56(18), pp.5147–5163. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b00273

Tavan, Y., & Hosseini, S. H. 2013. A novel integrated process to break the ethanol/water azeotrope using reactive distillation - Part I: Parametric study. Separation and Purification Technology, 118, 455–462. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.07.036

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Thermal compensation of a Multimode-Interference-based fiber optic sensor for water quality measurements

IM Domínguez-Lopez * **GF Pérez-García** * **D López-Cortés** *
A Flores-Rosas * **L Escalante-Zarate** * **VI Ruiz-Pérez** *

* *Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, Universidad Autónoma de Chiapas , Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México (e-mail: vruiz@unach.mx).*

Abstrac: In this work is presented a polymer-based athermalization method of an optical fiber sensor for water quality measurements. The inherent thermal sensitivity of fiber optic sensors has been leveraged to measure temperature variations in water body; however, in sensing other physical-chemical parameters, this temperature sensitivity limits the use of fiber optic sensors in thermally uncontrolled environments. This study proposes a thermal compensation method for Multimode Interference fiber optic devices by applying a polymeric coating with a negative thermo-optic coefficient (TOC) over a fraction of the total length of the multimode fiber (MMF) section, aiming to counteract the effects produced by the positive TOC of the optical fiber. It is demonstrated that by gradually increasing the length of the multimode section covered with the polymer, it is possible to invert the direction of the spectral shift produced by temperature variations, achieving stabilization for a particular length of covered MMF. The proposed method offers a cost-effective and passive alternative solution to the use of expensive and bulky thermal insulation systems, required for reliable operation of sensors under uncontrolled environmental conditions.

Keywords: Fiber optic sensors, thermal compensation, passive athermalization, multimodal interference, polymeric coating, negative thermo-optic coefficient, non-core fiber section, cost-effective solution.

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de la calidad del agua es de vital importancia en la vida humana, impactando desde la salud hasta la economía. La calidad del agua se ve impactada por la contaminación, el cambio climático, la actividad humana, entre muchos otros factores. La preservación de una buena calidad del agua trae un gran beneficio ambiental, la salud pública y la protección de los recursos humanos para futuras generaciones. De aquí la importancia de contar con instrumentación especializada para el cuidado de los recursos hídricos, la creación de sistemas de monitoreo de grandes cuerpos de agua, la detección oportuna de contaminantes y la gestión en general de nuestros recursos hídricos. El instrumental convencional de medición de la calidad del agua, es basado en componentes electrónicos principalmente; sin embargo, la principal desventaja de estos dispositivos radica en la susceptibilidad a fallos por contacto directo con líquidos, agentes corrosivos, y fallos bajo operación en ambientes extremos como alta presión o altas temperaturas. En este sentido, la tecnología de sensores de fibra óptica aparecen como la solución ideal como instrumental de medición de la calidad del agua, debido a su carácter dieléctrico, capacidad de sensado distribuido, remoto, en tiempo real e in situ. No obstante, los dispositivos de fibra óptica son intrínsecamente susceptibles a la temperatura debido al coeficiente termo-óptico positivo del vidrio de sílice, del que generalmente están hechos, dificultando su uso en aplicaciones en campo sin un control térmico estricto. Siempre que la temperatura no sea el parámetro a medir, los efectos térmicos en sensores de fibra óptica generan errores de medida, derivados de la calibración, pérdida de resolución espectral y falsos positivos en sistemas de alarma. En ambientes reales como tendidos de telecomunicaciones expuestos a ciclos térmicos día/noche, instalaciones cercanas a procesos de combustión en plantas industriales o instrumentación distribuida en plataformas marinas, la temperatura puede variar decenas de grados o sufrir gradientes locales, agravando la inestabilidad y la necesidad de mantenimientos y recalibraciones frecuentes.

En instrumentación convencional la corrección térmica suele realizarse midiendo la temperatura local con sensores metálicos (por ejemplo sondas de cobre o RTD). Estas mediciones se usan para realizar compensaciones en la electrónica de adquisición y recuperar la señal deseada. Aunque efectivos para mediciones puntuales, los sensores metálicos requieren conexión eléctrica, tienen limitaciones en ambientes corrosivos o con interferencia electromagnética, y son poco adecuados cuando se necesita sensado

⋆ Sponsor and financial support acknowledgment goes here. Paper titles should be written in uppercase and lowercase letters, not all uppercase.

distribuido o remoto sobre largas distancias. Los sensores de fibra óptica ofrecen ventajas claras frente a esas limitaciones: inmunidad a interferencias electromagnéticas, posibilidad de sensado distribuido a lo largo de kilómetros, baja atenuación y la capacidad de realizar mediciones remotas sin alimentación eléctrica en el punto de medida. En dispositivos de fibra óptica basados en el principio de Interferencia Multimodal (MMI, por sus siglas en inglés), la información se codifica generalmente en la respuesta espectral transmitida o reflejada, por lo que ésta debe ser estabilizada frente a variaciones térmicas, sin sacrificar la sensibilidad al parámetro de interés.

Teóricamente, un sensor óptico atermalizado puede implementarse siguiendo distintas estrategias. Estas incluyen: diseñar geometrías y recubrimientos con coeficientes de expansión térmica (CET) balanceados que reduzcan la variación dimensional; empalmar fibras con respuestas térmicas opuestas para lograr cancelación mutua; aplicar correcciones electrónicas/algorítmicas sobre la señal espectral en post-procesado; o bien, incorporar materiales con coeficiente termo-óptico (CTO) de signo opuesto para compensar el cambio generado por el sílice. Debe entenderse que el CTO es la medida del cambio del índice de refracción de un material con la temperatura.

En este trabajo proponemos una solución pasiva basada en la estrategia (iv). Para ello, se utiliza una sección no-core de fibra multimodo integrada en una estructura MMI y se recubre progresivamente con un polímero cuyo CTO es negativo, es decir, opuesto respecto al sílice. Controlando la longitud de la sección de fibra multimodal (MMF, por sus siglas en inglés), se busca neutralizar el corrimiento espectral inducido por la temperatura, logrando así estabilizar la respuesta espectral sin recurrir a correcciones electrónicas activas ni a recubrimientos complejos.

2. ESTADO DEL ARTE

La problemática de la sensibilidad térmica en dispositivos MMI tiene consecuencias operativas claras: el corrimiento espectral inducido por variaciones de temperatura produce errores de medida, deriva de calibración y falsos positivos en sistemas de sensado en campo. En entornos reales, por ejemplo tendidos de telecomunicaciones al aire libre sujetos a ciclos día/noche, instrumentación cerca de hornos industriales o sensores distribuidos en plataformas offshore, las variaciones térmicas y los gradientes locales afectan directamente la fidelidad de la respuesta espectral del sensor, lo que obliga a soluciones de corrección que en la práctica incrementan la complejidad y el coste del sistema.

Los sensores convencionales basados en metales (p. ej. sondas de cobre o RTD) resuelven parcialmente el problema midiendo la temperatura local y aplicando correcciones en la electrónica de adquisición; sin embargo, su necesidad de conexionado eléctrico, su susceptibilidad en ambientes corrosivos y la imposibilidad de monitoreo distribuido los hacen poco adecuados cuando se requiere monitorización remota y robusta sobre largas distancias. Frente a ello, la fibra óptica aparece como una plataforma atractiva: inmunidad a interferencias electromagnéticas, capacidad de sensado distribuido y lectura remota sin alimentación en el punto de medida, lo que motiva la búsqueda de estrategias para estabilizar la respuesta espectral de dispositivos MMI sin sacrificar sensibilidad.

En la evolución de la investigación sobre estabilidad térmica, las primeras soluciones prácticas se centraron en el control del encapsulado y las tensiones mecánicas aplicadas. Li (2007) planteó y demostró experimentalmente que el diseño del encapsulado y la selección de materiales con CETs adecuados, pueden reducir significativamente la deriva térmica en configuraciones MMI, proponiendo una opción interesante basada en el control de CETs y tensiones mecánicas en el ensamblado. Empleando una plataforma de cerámica, sobre la que el dispositivo de fibra óptica fue encapsulado, se logró estabilizar la respuesta del sensor en un amplio rango de temperatura. Por su parte, Tripathi et al. (2012) mostraron teóricamente que ajustando el dopado del núcleo de dos secciones de MMF con diferentes materiales de dopaje, (P_2O_5 y GeO_2), es posible diseñar dispositivos intrínsecamente menos sensibles a la temperatura, con lo que demuestran que es posible manipular el CTO de la fibra óptica para minimizar dependencia térmica empleando dos fibras con CTO opuestos.

Paralelamente al dopado, se investigaron materiales alternativos y recubrimientos como vía efectiva de control térmico. Huang et al. (2012) evidenciaron que las fibras ópticas poliméricas en configuraciones MMI presentan mecanismos modales y propiedades ópticas explotables para detección (o sensado), lo que sugiere la elección del material guía influye fuertemente en la respuesta térmica.

Las revisiones y estudios posteriores consolidaron estas vías de trabajo y destacaron retos adicionales. Guzmán-Sepúlveda et al. (2021) sintetizaron tendencias en sensores MMI y subrayaron la convergencia entre diseño geométrico, dopado y recubrimientos funcionales como la ruta más prometedora para aplicaciones de campo. En la misma dirección, Pospori et al. (2022) investigaron la respuesta a temperatura y humedad de sensores basados en polímeros, mostrando que la respuesta térmica puede incluso invertirse mediante pre-deformación o elección de polímero, pero alertando sobre la necesidad de considerar efectos ambientales como la humedad y la durabilidad del recubrimiento.

Más recientemente, revisiones centradas en materiales y dispositivos híbridos han puesto de manifiesto el potencial de polímeros diseñados para la ingeniería termo-óptica: Xie et al. (2023) enfatizaron que formulaciones poliméricas con CTO negativo, permiten contrarrestar los cambios del sílice y habilitan recubrimientos atermalizantes efectivos. Complementando las estrategias exclusivamente materiales, Zhang et al. (2023) propusieron configuraciones híbridas (por ejemplo MMI combinada con resonancia plasmónica superficial en geometrías U-shaped) que muestran cómo la combinación de mecanismos físicos puede aumentar la robustez térmica en aplicaciones biosensoras y de campo.

La secuencia histórica del campo, desde soluciones de embalaje y control mecánico, pasando por el diseño intrínseco de la fibra y la incorporación de polímeros, hasta las propuestas híbridas actuales, plantea un marco consolidado: la atermalización efectiva requiere una estrategia integrada que combine selección de materiales, recubrimientos y diseño geométrico. Es en ese marco donde se inserta la

solución propuesta en este trabajo, en el que se utiliza un recubrimiento polimérico con CTO negativo sobre una sección de MMF en una estructura MMI para estabilizar la respuesta espectral en condiciones ambientales no controladas.

3. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

El dispositivo MMI propuesto consiste en una estructura tipo SMS (Single-Mode–Multi-Mode–Single-Mode), como se muestra en la Figura 1, en la que la luz procedente de una fibra monomodo (SMF, por sus siglas en inglés) se acopla a una sección de MMF sin núcleo (NCF, por sus siglas en inglés) y vuelve a acoplarse a una SMF a la salida. Esta configuración ha sido ampliamente utilizada en el diseño de sensores debido a su evidente facilidad de fabricación, ya que no se requiere de equipo sofisticado, además de su respuesta tipo filtro, lo que lo hace extremadamente útil en sensores basados en modulaciones espectrales. En esta estructura SMS, la luz proviene de la fuente, y viaja por la primera SMF hasta la sección de MMF, en la que se excitan múltiples modos, determinados principalmente por el diámetro de la MMF. Estos modos son propagados dentro de la MMF interfiriendo entre sí hasta llegar a la interfaz MMF-SMF con una diferencia de fase acumulada. Para una longitud particular de propagación en la MMF, los modos guiados se encuentran en fase, es decir, interfieren constructivamente, lo cual genera una distribución transversal de intensidad similar a aquella obtenida en la primera interfaz SMF-MMF (distribución gaussiana correspondiente al modo fundamental de la SMF a la entrada de la estructura SMS). Este fenómeno se conoce como el principio de autoimagen, un efecto propio de la interferencia multimodal generada únicamente en guías multimodo.

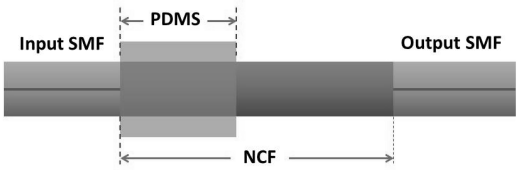


Figura 1. Estructura SMF-NCF-SMF, en la que sección de NCF se encuentra parcialmente cubierta con polidimetilsiloxano (PDMS) para la atermalización del dispositivo de Interferencia multimodal (MMI).

Debido al efecto de *autoimagen* (self-imaging), se forman réplicas periódicas del campo de entrada a lo largo de la sección multimodo; la longitud de la sección de NCF se elige para coincidir con un orden de autoimagen que maximice la transferencia de potencia para la longitud de onda de interés, generando así la respuesta espectral tipo filtro, característica del dispositivo de MMI.

Para eliminar o minimizar la dependencia térmica del dispositivo MMI de fibra óptica, se recubre parcialmente la sección multimodal con polidimetilsiloxano (PDMS), que presenta un coeficiente termo-óptico (CTO, dn/dT) negativo. Mientras que el sílice muestra un CTO positivo (el índice del vidrio aumenta con la temperatura, típicamente del orden de $7{,}0 \times 10^{-6}\,\mathrm{K}^{-1}$), el PDMS tiene un CTO de aproximadamente $-4{,}5 \times 10^{-4}\,\mathrm{K}^{-1}$. Al recubrir una longitud L_p con PDMS se incorpora una región con respuesta térmica opuesta a la del tramo sin recubrimiento; controlando la relación entre la longitud recubierta L_p y la longitud total del NCF L_{tot} es posible reducir o anular la variación neta del índice efectivo con la temperatura, logrando así una estabilización pasiva de la respuesta espectral.

La pendiente observada para el caso sin recubrimiento fue de aproximadamente 12,3 pm/°C, mientras que para 7 mm recubiertos se midió cerca de $-10{,}7$ pm/°C. Para 4 mm la sensibilidad se redujo a aproximadamente 1,4 pm/°C, y para 2 mm la pendiente fue 5,29 pm/°C.

3.1 Principio de operación

En una estructura SMS la distribución espectral del acoplamiento viene determinada por parámetros geométricos y ópticos del tramo multimodo: longitud efectiva total de la MMF L_{tot}, diámetro efectivo D_{eff} y índice efectivo modal n_{eff}. El fenómeno de autoimagen condiciona que la posición del pico de transmisión (o longitud de onda de máxima intensidad, λ_{peak}) dependa de las constantes ópticas y geométricas del MMF; para una estructura compuesta por dos secciones de MMF con características distintas, por ejemplo, para la estructura propuesta se considera constituida por una sección de MMF cuyo revestimiento es el polímero, y otra sección sin revestimiento (o el aire como revestimiento), siendo el núcleo el mismo en ambas secciones, se puede expresar de forma aproximada la longitud de onda de máxima intensidad como una combinación ponderada de las contribuciones de cada sección:

$$\lambda_{\mathrm{peak}} \approx \frac{2\big(n_1 D_1 L_1 + n_2 D_2 L_2\big)}{L_T}, \tag{1}$$

donde los subíndices 1 y 2 se refieren respectivamente a la primera sección de MMF (con recubierto) y a la segunda sección (sin recubrimiento), con n_i el índice efectivo, D_i el diámetro efectivo y L_i la longitud del sub-tramo, y $L_T = L_1 + L_2$ la longitud total del NCF considerada.

Cuando la temperatura varía, los índices efectivos n_i cambian de acuerdo con el CTO correspondiente. Una forma simple de relacionar la variación espectral con la variación de índice efectivo es mediante la relación,

$$\frac{d\lambda_{\mathrm{peak}}}{dT} \approx \lambda_{\mathrm{peak}} \frac{1}{n_{\mathrm{eff}}} \frac{dn_{\mathrm{eff}}}{dT}, \tag{2}$$

donde n_{eff} es el índice efectivo global del tramo multimodo. Si aproximamos dn_{eff}/dT como una media ponderada entre las contribuciones del tramo recubierto y del tramo desnudo, obtenemos:

$$\frac{dn_{\mathrm{eff}}}{dT} \approx \frac{(L_{\mathrm{tot}} - L_p)\left(\frac{dn_{\mathrm{si}}}{dT}\right) + L_p\left(\frac{dn_{\mathrm{PDMS}}}{dT}\right)}{L_{\mathrm{tot}}}. \tag{3}$$

Con $dn_{\mathrm{si}}/dT > 0$ y $dn_{\mathrm{PDMS}}/dT < 0$, existe un valor crítico de la fracción recubierta L_p/L_{tot} para el cual $dn_{\mathrm{eff}}/dT \approx 0$. En esa condición teórica se cumple $d\lambda_{\mathrm{peak}}/dT \approx 0$, es decir, la longitud de onda pico queda estabilizada frente a variaciones térmicas.

Cabe señalar que las expresiones anteriores son aproximaciones físicas útiles para el diseño y la interpretación. En la práctica, la respuesta térmica final también está influenciada por: (i) la distribución modal (cómo se excitan los modos en el tramo multimodo), (ii) la modificación del confinamiento modal por el recubrimiento (el PDMS altera la condición de contorno y puede cambiar el diámetro efectivo D_i), y (iii) efectos mecánicos (cambios de tensión y acoplamiento inducidos por diferencias de CET entre sílice y recubrimiento). No obstante, el modelo de promedio ponderado es suficiente para predecir la existencia de una longitud recubierta óptima que cancele la sensibilidad térmica del pico espectral.

Por lo tanto, la estrategia consiste en diseñar la fracción de NCF recubierta con PDMS de modo que la contribución negativa del polímero compense la contribución positiva del sílice, obteniendo así una configuración atermal pasiva que estabiliza la firma espectral del MMI sin requerir corrección electrónica activa.

3.2 Configuración experimental y justificación teórica

Para demostrar experimentalmente la estabilización espectral del dispositivo de MMI se empleó una cavidad láser en anillo basada en fibra. La elección de una cavidad láser responde a dos objetivos experimentales: (i) realizar la selectividad espectral del MMI, la estructura SMS actúa como filtro intracavidad cuyo máximo de transmisión determina la longitud de onda de emisión del láser, y (ii) aumentar la relación señal/ruido de la medición espectral, ya que la emisión láser presenta picos estrechos y fácilmente localizables con el analizador de espectros óptico (OSA, por sus siglas en inglés).

La cavidad incluye 10 m de fibra dopada con erbio (EDF) como medio activo, bombeada por un diodo a 980 nm mediante un WDM 980/1550 nm; un acoplador 90/10 permite extraer el 10 % de la potencia para monitoreo continuo en el OSA sin interrumpir significativamente la dinámica intracavidad (ver Fig. 2). En esta configuración, el dispositivo de MMI (estructura SMS con NCF parcialmente recubierto) se coloca dentro del anillo y actúa como el elemento de filtrado espectral que determina la longitud de onda de máxima ganancia y, por tanto, la línea láser observada.

El uso de PDMS (Sylgard 184, mezclado 10:1 y curado 48 h) como recubrimiento responde a su coeficiente termo-óptico negativo conocido y a su facilidad de aplicación. Según la referencia [16], el índice de refracción para el PDMS es de 1,4194 para una longitud de onda de 1550 nm (Schneider et al., 2009), por lo que se satisface el principio de reflexión total interna al ser usado como revestimiento. Experimentalmente se preparó el recubrimiento empleando la técnica de inmersión (dip-coating), sumergiendo de la NCF verticalmente a velocidad uniforme dentro de un tubo previamente llenado con el PDMS, hasta la longitud requerida, y posteriormente retirando la fibra a la misma

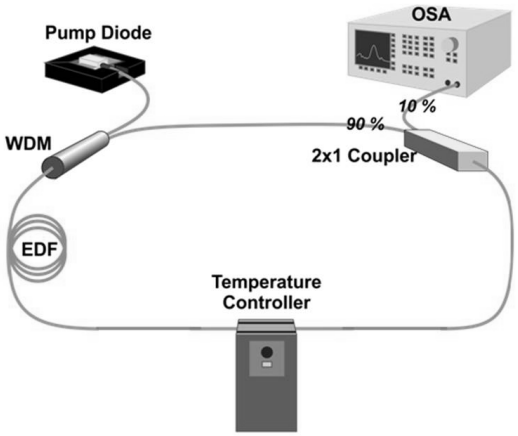


Figura 2. Arreglo experimental.

velocidad. La longitud de la NCF en nuestro dispositivo final fue de 56,7 mm, obteniéndose la máxima intensidad a una longitud de onda de 1583,3 nm. Una vez cubierta la NCF la longitud deseada, se dejó curar a temperatura ambiente para minimizar tensiones térmicas residuales por un período de 48 horas. Para la realización de las pruebas de temperatura, se utilizó un baño circulador refrigerado (LCB R13, Labtech), con resolución de 0,1 °C y se incrementó desde 22 °C hasta poco más de 100 °C en pasos de 15 °C, registrando en cada paso la longitud de onda de la emisión láser con el OSA. Esta estrategia permite seguir con precisión la variación de la longitud de onda de pico (λ_{peak}) en función de la temperatura y de la fracción de MMF recubierta L_p/L_{tot} con el polímero.

Desde un punto de vista físico y para interpretar los resultados, es instructivo considerar dos efectos relacionados que gobiernan la variación térmica de la longitud de onda pico: (i) la variación del índice efectivo modal (dn_{eff}/dT) debida a los CTOs de los materiales (sílice y PDMS) y (ii) la variación geométrica efectiva (cambio de la longitud óptica efectiva por expansión térmica y por cambios en el confinamiento modal). Una expresión útil de primer orden para la sensibilidad térmica es

$$\frac{d\lambda_{\mathrm{peak}}}{dT} \approx \lambda_{\mathrm{peak}} \left(\frac{1}{n_{\mathrm{eff}}} \frac{dn_{\mathrm{eff}}}{dT} + \frac{1}{L_T} \frac{dL_T}{dT} \right), \qquad (4)$$

donde el primer término refleja efectos ópticos (debidos al CTO) y el segundo efectos geométricos (debidos al CET). Para el tramo compuesto (parte recubierta y parte sin recubrimiento) se usa la aproximación de media ponderada indicada anteriormente:

$$\frac{dn_{\mathrm{eff}}}{dT} \approx \frac{(L_T - L_p)\, dn_{\mathrm{si}}/dT + L_p\, dn_{\mathrm{PDMS}}/dT}{L_T}. \qquad (5)$$

Dado que $dn_{\mathrm{si}}/dT > 0$ y $dn_{\mathrm{PDMS}}/dT < 0$, existe una fracción recubierta crítica para la cual la contribución óptica se cancela. Además, la contribución geométrica $\frac{1}{L_T} dL_T/dT$ incluye tanto la expansión térmica lineal efectiva de sílice y polímero como cambios en la longitud óptica efectiva por variaciones de confinamiento modal; en muchos casos la componente óptica (CTO) domina la sensibilidad espectral, pero la componente geométrica no es despreciable y debe considerarse en diseños finos.

Finalmente, desde la perspectiva de sensado, colocar el MMI dentro de la cavidad láser simplifica la cuantificación de pequeños desplazamientos de la longitud de onda de emisión: la emisión láser "seguirá" el máximo de transmisión del filtro MMI, de modo que el desplazamiento observado en la longitud de onda láser corresponde de forma directa al corrimiento del filtro. Para evaluar la robustez experimental es importante caracterizar también cambios en pérdidas de inserción, ancho de línea y razón señal/ruido, ya que el recubrimiento puede modificar el acoplo modal y la atenuación intracavidad. En trabajos futuros conviene además medir la dependencia con velocidad de calentamiento en el índice de refracción del PDMS, efectos de curado (contracción del polímero) y la respuesta a ciclos térmicos repetidos para garantizar la reproducibilidad y durabilidad del tratamiento.

4. RESULTADOS

Utilizando el arreglo mostrado en la Figura 2, se realizó la caracterización de la respuesta espectral al variar la temperatura para 4 longitudes de MMF con recubrimiento polimérico. Los resultados experimentales obtenidos revelan claramente el efecto del recubrimiento con PDMS en el desplazamiento espectral al variar la temperatura. En ausencia de recubrimiento (0 mm de PDMS), el espectro MMI presenta un desplazamiento hacia el rojo pronunciado al aumentar la temperatura, como puede observarse en la Figura 3, en la que se observa un desplazamiento de alrededor de 1 nm, con un incremento de temperatura de cerca de 80 °C al calentar de 22 °C a 100 °C. La pendiente de calibración estimada es de aproximadamente 12,3 pm/°C, indicando un aumento de índice de refracción neto positivo.

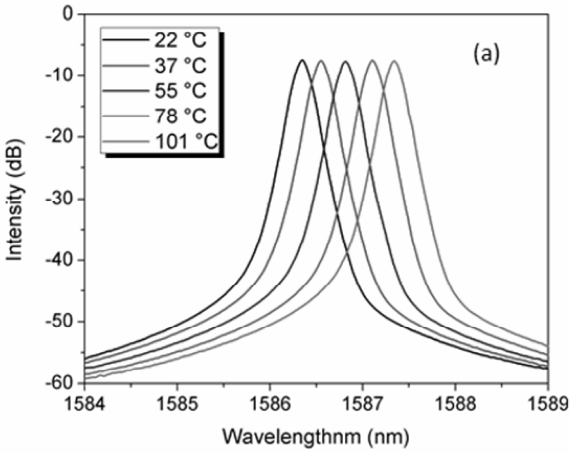


Figura 3. Desplazamiento espectral correspondiente a una MMF sin recubrimiento polimérico.

Al recubrir 7 mm de la fibra con PDMS, la tendencia se invierte: la Figura 4 muestra un desplazamiento hacia el azul con el incremento de temperatura (de 22 °C a 112 °C), desplazándose de 1604,2 nm a 1602,9nm. Esto evidencia que el segmento recubierto de 7 mm domina el comportamiento térmico del dispositivo de MMI y su coeficiente termo-óptico negativo produce un índice efectivo decreciente con T. El desplazamiento espectral fue lineal en función de la temperatura con una pendiente negativa de aproximadamente $-10{,}7$ pm/°C.

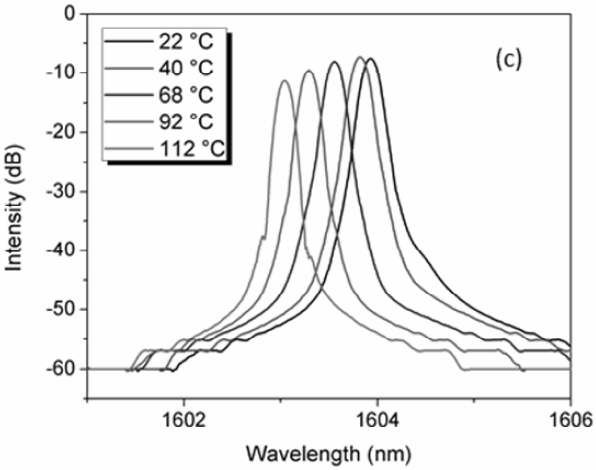


Figura 4. Desplazamiento espectral con 7 mm de la NCF recubierta con PDMS.

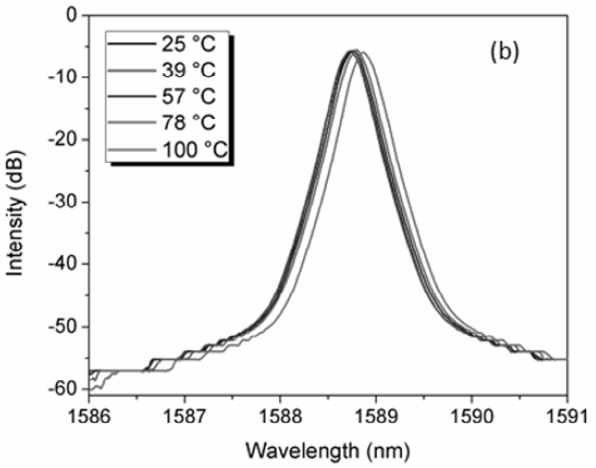


Figura 5. Desplazamiento espectral con 4 mm de MMF recubierta con PDMS, longitud para la que se observa un desplazamiento mínimo.

Esto indica la existencia de una determinada longitud de MMF recubierta con PDMS para la cual se conseguiría la estabilización de la respuesta espectral ante las fluctuaciones de temperatura. Se realizaron pruebas con otras longitudes menores a 7 mm, resultando que la mejor estabilizacion se obtuvo para una longitud de MMF recubierta de 4 mm, una longitud casi intermedia, como puede observarse en la Figura 5: los espectros para temperaturas de 25 °C hasta 100 °C prácticamente coinciden en la misma posición, indicando una sensibilidad cercana a cero. La pendiente correspondiente fue de aproximadamente 1,4 pm/°C, lo cual es significativamente menor que para el caso sin revestimiento polimérico. Se observó una desviación mayor a 100 °C, lo que puede deberse a algún error en la medición o bien, a la degradación del PDMS. En la Figura 6 se resumen estos resultados, representando gráficamente el desplazamiento espectral relativo frente a

la temperatura para 4 longitudes de MMF con recubrimiento polimérico. Se añade el resultado correspondiente a 2 mm, para el cual aún se observa un desplazamiento hacia el rojo, con una pendiente de 5,29 pm/°C.

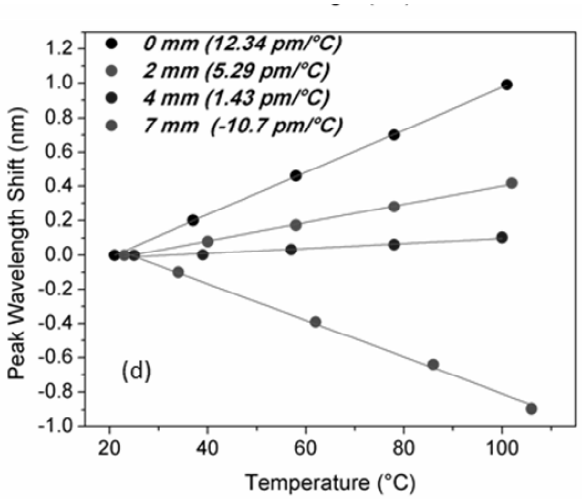


Figura 6. Desplazamiento relativo de la longitud de onda en función de la longitud de MMF recubierta con PDMS, para 4 longitudes: 0 mm, 2 mm, 4 mm, 7 mm. El comportamiento atérmico se obtiene con 4 mm.

En resumen, los resultados experimentales muestran la eficiencia del método propuesto, revelando que al incrementar la fracción recubierta de la sección multimodal con PDMS (de 0 a 7 mm) el desplazamiento de la longitud de onda de máxima intensidad versus temperatura disminuye linealmente, cruzando por cero alrededor de 4 mm y volviéndose negativa más allá. Por lo tanto, se ha demostrado que existe una configuración óptima de compensación térmica en la cual el efecto del CTO positivo de la fibra de sílice es cancelado por el efecto del CTO negativo del PDMS.

5. CONCLUSIONES

Se ha demostrado experimentalmente un método de compensación de la sensibilidad a la temperatura mediante el uso de polímeros con CTO negativo, para dispositivos de fibra óptica cuyo principio de operación se basa en los efectos de MMI, conocidos como dispositivos de MMI. El uso del polímero PDMS con CTO negativo logró compensar eficientemente el CTO positivo de la sílice al recubrir 4 mm de la sección de MMF. El elemento clave para nuestra configuración consistió en una MMF sin núcleo, la cual puede considerarse como una fibra multimodal sin revestimiento para nuestros fines, con la que fue posible cubrir parcialmente la MMF, pudiendo considerarse como un dispositivo de MMI con dos secciones de MMF con distinto índice de refracción efectivo. Esto nos permitió una forma práctica de variar las proporciones entre las longitudes de las dos diferentes MMFs hasta hallar la proporción óptima para lograr el efecto atérmico en la respuesta del sensor. Cabe mencionar que, bajo esta configuración, la sección de MMF sin revestimiento puede ser empleada para medir el índice de refracción de sustancias líquidas mediante un dispositivo insensible a la temperatura. No se logró cancelar completamente la sensibilidad a la temperatura debido a nuestras limitaciones en el equipo de caracterización, sin embargo, con equipo de mayor precisión se podría obtener una mejor atermalización del dispositivo. Es importante destacar la enorme utilidad de sensores atérmicos, principalmente para la medición de la calidad del agua aplicados en el monitoreo de grandes cuerpos de agua como ríos, aguas subterráneas o presas hidroeléctricas, generalmente bajo condiciones ambientales no controladas, ya que de esta forma se puede prescindir de equipo adicional de aislamiento térmico para evitar errores de medición, tomando en cuenta el hecho de que la temperatura puede variar en decenas de grados en distintos horarios del día. Finalmente, cabe mencionar que el método propuesto es de bajo costo, tanto en el proceso de fabricación del dispostivo como por las fibras ópticas estandar empleadas, comercialmente disponibles, así como por el bajo costo del polímero empleado.

REFERENCIAS

Guzmán-Sepúlveda, J.R., Sánchez, O., Toral, L., et al. (2021). Optical sensing using fiber-optic multimode interference devices: A review of nonconventional sensing schemes. *Sensors*, 21(5), 1862. doi:10.3390/s21051862.

Huang, J., Lan, X., Wang, H., Yuan, L., Wei, T., Gao, Z., and Xiao, H. (2012). Polymer optical fiber for large strain measurement based on multimode interference. *Optics Letters*, 37(20), 4308–4310. doi: 10.1364/OL.37.004308.

Li, E. (2007). Temperature compensation of multimode-interference-based fiber devices. *Optics Letters*, 32(14), 2064–2066. doi:10.1364/OL.32.002064.

Pospori, A., Webb, J., et al. (2022). Temperature and humidity sensitivity of polymer optical fiber sensors. *Sensors*, 22(19), 7233. doi:10.3390/s22197233.

Schneider, F., Draheim, J., Kamberger, R., and Wallrabe, U. (2009). Process and material properties of polydimethylsiloxane (PDMS) for optical MEMS. *Sens. Actuators A, Phys.*, 151(2), 95–99.

Tripathi, S.M., Kumar, A., Kumar, M., and Bock, W.J. (2012). Temperature-insensitive fiber-optic devices using multimode interference effect. *Optics Letters*, 37(22), 4570–4572. doi:10.1364/OL.37.004570.

Xie, Y., Doe, J., and Smith, A. (2023). Polymer and hybrid optical devices manipulated by the thermo-optic effect. *Polymers*, 15(18), 3721. doi:10.3390/polym15183721.

Zhang, H., Wang, L., and Li, Q. (2023). U-shaped temperature self-compensating fiber-optic sensor combining mmi and spr. *Optics Letters*, 48(8), 2138–2141.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Strategies for Knowledge Management and Intellectual Property in Technological Innovation Projects under Industry 4.0 and 5.0 Contexts

Morales-Lechuga, Víctor Manuel*, Ochoa-Toledo, Luis*, Solis-Oviedo Carlos Javier, Pérez-Escamirosa, Fernando*,**

** Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) – Universidad Nacional Autónoma de México,*
***Posgrado de Ingeniería Mecánica – Universidad Nacional Autónoma de México*
Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 Ciudad de México. México.
(Tel: 5556228601 - 1303; e-mail: victor.morales@icat.unam.mx)

Abstract: This article presents a set of guidelines and key elements for the development of a knowledge management (KM) model applied to technological innovation and intellectual property (IP) protection, with an emphasis on the systematization, traceability, and valorization of knowledge generated and incorporated in technological projects. Based on the analysis of a case study involving the development of a minimally invasive surgery simulator, the article explores how enabling technologies from Industry 4.0 and 5.0—such as artificial intelligence (AI) and blockchain—can inform the structuring of comprehensive KM frameworks. The proposal is grounded on the principles of ISO 30401:2018 and ISO 56002:2019, reinforcing its applicability in highly innovative, technologically complex environments focused on the creation, protection, and transfer of intangible assets. The article also discusses the challenges and limitations faced by academic and research groups in emerging economies regarding the adoption of advanced digital technologies in KM processes, highlighting the need for strategies and policies to close the existing digital and innovation gaps.

Keywords: Knowledge management; Technological innovation; Intellectual property; Enabling technologies; Blockchain; ISO standards.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión del conocimiento (GC) constituye un elemento estratégico para las organizaciones que operan en entornos dinámicos, tecnológicos y altamente competitivos. Su integración en proyectos de innovación tecnológica se convierte en un factor clave para asegurar la generación, protección y aprovechamiento eficiente del conocimiento, así como para potenciar la creación de activos intangibles de alto valor.

En este contexto, el presente artículo propone un conjunto de pautas orientadas hacia la construcción de un modelo de gestión del conocimiento aplicable a proyectos tecnológicos en el marco de la Industria 4.0 y 5.0, considerando la protección de la propiedad intelectual (PI) como un componente estratégico. El trabajo refiere el análisis de un caso aplicado en el desarrollo de un simulador de cirugía mínimamente invasiva, permitiendo identificar elementos críticos que deben ser considerados en la estructuración futura de modelos de GC integrales y adaptados a contextos de alta innovación.

2. FUNDAMENTOS DE LA GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO EN LA INDUSTRIA 4.0 Y 5.0

La gestión del conocimiento (GC) ha evolucionado a lo largo del tiempo, adaptándose a los cambios tecnológicos y las necesidades organizacionales. (Correia et al., 2020). La Industria 4.0 ha sido clave en la digitalización del conocimiento, integrando herramientas como el Internet de las Cosas (IoT), Big Data e Inteligencia Artificial (IA) para mejorar la gestión del conocimiento en entornos industriales avanzados primero, y posteriormente en prácticamente en todo tipo de organizaciones.

Sin embargo, la Industria 5.0 introduce un paradigma en el que la colaboración entre humanos y máquinas inteligentes toma un papel central, buscando equilibrar la automatización con la creatividad humana y la sostenibilidad (Nahavandi, 2019). Este enfoque requiere estrategias de GC más sofisticadas, donde la protección de la propiedad intelectual y la sistematización del conocimiento sean aspectos críticos para la innovación tecnológica y la generación de valor en las organizaciones.

2.1 Modelos y estrategias de gestión del conocimiento

Diferentes modelos de GC han sido propuestos en la literatura para su implementación en la Industria 4.0 y 5.0. Entre los más relevantes se encuentran:

i. Nonaka y Takeuchi (1995): Modelo SECI (Socialización, Externalización, Combinación, Internalización), que describe la conversión del conocimiento tácito en explícito y viceversa.

ii. Davenport y Prusak (1998): Modelo basado en la adquisición, almacenamiento, distribución y uso del conocimiento en organizaciones.

iii. Propuesta de Alavi y Leidner (2001): Modelo de GC que enfatiza el uso de tecnologías de información para la administración del conocimiento organizacional.

iv. Open Innovation (Chesbrough, 2003): Plantea un esquema de colaboración donde el conocimiento se comparte entre empresas y universidades para acelerar el desarrollo tecnológico.

v. Gestión del Conocimiento Basada en IA: Utiliza Machine Learning y Big Data para analizar grandes volúmenes de información y optimizar la toma de decisiones en innovación (Taherdoost & Madanchian, 2023; Jarrahi et al., 2023).

De esta manera, la GC ha evolucionado desde modelos conceptuales basados en la conversión del conocimiento de Nonaka y Takeuchi, hacia enfoques más integrales, considerando el conocimiento como un activo estratégico que debe ser gestionado de manera sistemática, alineada a los objetivos organizacionales y con orientación hacia la generación de valor (Paliwal et.al., 2024).

Estos modelos han encontrado diversas adaptaciones prácticas en la Industria 4.0; por ejemplo, el modelo SECI ha demostrado ser particularmente útil en sectores de manufactura avanzada, donde la conversión de conocimiento tácito a explícito se facilita mediante plataformas digitales colaborativas (Abubakar et al., 2019).

La integración de un sistema de gestión del conocimiento donde la combinación de diferentes tecnologías (IA, IoT, Big Data) en un único sistema de GC es un reto técnico complejo (Andreeva y Kianto, 2012). Representan oportunidades en que no solo optimizan procesos, sino que también facilitan la gestión de recursos, mejoran la toma de decisiones y maximizan el impacto económico, social y ambiental de las innovaciones. (Cortés, C. B. Y. et al., 2017), aunque también implican mayores riesgos sobre la información.

En el ámbito de la innovación tecnológica, la GC en sí mismo y con el apoyo de estas tecnologías permite articular capacidades, recursos y procesos para acelerar el desarrollo de soluciones, reducir riesgos y facilitar la protección y transferencia de resultados.

2.2 Tecnologías facilitadoras para la gestión del conocimiento en el contexto de la innovación

Las tecnologías emergentes, aunque potencialmente transformadoras, presentan desafíos específicos al integrarse a los procesos existentes de gestión del conocimiento orientados a la innovación. Esto es especialmente plasmado en términos de interoperabilidad, aceptación cultural y necesidades de capacitación especializada. Algunos ejemplos incluyen:

- Inteligencia Artificial (IA): Herramientas de procesamiento de lenguaje natural y machine learning para la identificación de patrones y generación de conocimiento automatizado, como son descritos por Ofori-Boateng et al. (2024), aplicados a revisiones de literatura científica.
- Internet de las Cosas (IoT): Dispositivos conectados que permiten la recopilación y análisis de datos en tiempo real para mejorar la toma de decisiones organizacionales. Como son descritos por Santos et al., (2021), donde los datos generados por varias fuentes como controladores de máquinas, sensores y sistemas de fabricación, entre otros, permite unir volumen, variedad y velocidad de los datos, para crear oportunidades de mejorar la innovación sostenible en las que le llama “Fábricas del Futuro”.
- Big Data: Análisis de datos a gran escala que permite identificar tendencias, patrones y oportunidades de mejora en la gestión del conocimiento. En este sentido, Ghasemaghaei & Calic (2019) han realizado estudios donde se analizan como determinadas características del big data mejoran la generación de conocimiento basado en datos, lo que, en consecuencia, impacta la competencia de innovación de las empresas.
- Blockchain: Tecnología que garantiza la seguridad y trazabilidad del conocimiento almacenado y compartido en entornos digitales. Habiendo surgido con las llamadas bitcoin, esta tecnología trasciende el sector financiero y otros sectores impactando en los modelos de negocio sobre todo en empresas u organizaciones creativas. (Ølnes et al., 2017).

La digitalización ha permitido la integración de tecnologías avanzadas en algunos aspectos relacionados con los procesos de innovación. En la siguiente Tabla 1 se muestra un resumen de las características que ofrecen determinadas tecnologías facilitadoras en los proyectos de investigación y desarrollo (I&D), y particularmente en lo que se refiere a la protección de la propiedad intelectual (PI).

Tabla 1. Uso de tecnologías facilitadoras en la Gestión de la PI en el contexto de la I&D

Tecnología	Aplicación en I&D	Aplicación en protección de PI
Big Data	Análisis predictivo de tendencias en innovación	Monitoreo de infracciones de patentes
Blockchain	Creación de registros seguros de avances científicos	Protección de derechos de autor y patentes
IA y Machine Learning	Identificación de oportunidades de I&D mediante análisis de datos	Evaluación de originalidad de nuevas invenciones
IoT	Conectividad entre equipos de I&D en tiempo real	Supervisión de uso de tecnología patentada

2.3 Registro y seguridad de la información de los proyectos de innovación: el papel del Blockchain en el proceso de gestión del conocimiento

En todo el proceso de gestión de un proyecto de investigación y desarrollo tecnológico, el uso del Blockchain permite registrar información en bloques enlazados mediante criptografía, creando un registro seguro, transparente e inmutable. Algunas aplicaciones concretas en proyectos o actividades de innovación se mencionan a continuación:

i. Registro y prueba de autoría: una aplicación llamada *Proof of Existence (PoE)* es una aplicación blockchain que permite registrar documentos digitales como evidencia segura e inmutable de creación y autoría. En este sentido, Lemieux (2016), partiendo de requisitos establecidos en normas de gestión de registros y preservación digital, específicamente ISO 15489, ISO 14721 e ISO 16363,

analizó la aplicabilidad de la tecnología Blockchain para un sistema de registro de tierras en un país en desarrollo.

ii. Ya visto en procesos de innovación, esto es útil para las bitácoras y registro de productos e información resultado de los proyectos y que como evidencia se pueden usar para el caso de patentes, derechos de autor y en general de autoría.

iii. Trazabilidad y licenciamiento: *IPwe* es una plataforma que utiliza blockchain para la gestión del licenciamiento y transacción de patentes a nivel global, automatizando procesos mediante contratos inteligentes. (Burstall & Clark, 2018).

iv. Gestión automatizada de regalías: La plataforma *Ujo Music* utiliza contratos inteligentes de Ethereum para automatizar la distribución instantánea de regalías a músicos cada vez que sus obras son utilizadas. (O'Dair, 2019).

v. Protección contra falsificación: La iniciativa *Everledger* utiliza blockchain para registrar diamantes y artículos de lujo, permitiendo verificar autenticidad y evitar falsificaciones. (Montecchi et al., 2019).

vi. Colaboración segura en I&D: *Blockchain for Open Science (BOS)* es una propuesta para gestionar colaboraciones científicas usando blockchain, compartiendo información de forma segura y transparente, facilitando auditorías en investigaciones compartidas (Van Rossum, J., 2018).

Estos ejemplos reflejan aplicaciones reales o potenciales de blockchain en la innovación tecnológica y protección efectiva de la información y de la propiedad intelectual.

3. PAUTAS HACIA UN MODELO DE GC APLICADO A PROYECTOS TECNOLÓGICOS

A partir del análisis realizado y de la revisión de herramientas, plataformas y estrategias documentadas en el contexto del caso de estudio, este trabajo no propone un modelo formal completo, pero sí identifica los elementos clave que debieran integrarse en un modelo de gestión del conocimiento aplicable a proyectos de innovación tecnológica en entornos 4.0 y 5.0.

3.1 Hacia un modelo de GC aplicado a la innovación tecnológica

Las pautas conceptuales y funcionales identificadas incluyen:

1. Captura del conocimiento: mediante bases de datos, entrevistas estructuradas, sensores, registros digitales y resultados de simulaciones.
2. Sistematización y almacenamiento: organización del conocimiento en estructuras digitales interoperables que permitan su trazabilidad.
3. Análisis y valorización: uso de herramientas de inteligencia artificial, big data y visualización para identificar patrones, oportunidades y riesgos.
4. Protección y trazabilidad: integración de tecnologías como blockchain para registrar los avances y garantizar la autoría y el control de la información.
5. Transferencia y escalamiento: promoción del conocimiento generado hacia otros proyectos, sectores o instituciones, aprovechando plataformas colaborativas.

Estas pautas recogen principios de modelos previos como el SECI de Nonaka y Takeuchi, Open Innovation de Chesbrough, y propuestas de GC basada en inteligencia artificial, pero adaptadas a las condiciones específicas de proyectos de desarrollo tecnológico e innovación en el contexto de la Industria 4.0 y 5.0. La Tabla 2 siguiente resume lo que pueden ofrecer algunos de los modelos de GC existentes en los entornos de innovación respecto a lo que nos ofrecen las pautas propuestas en este trabajo.

Tabla 2. Características de modelos de GC existentes en comparación con las pautas de un modelo de GC propuesto

Criterio	Modelo SECI	Open Innovation	Pautas propuestas en este trabajo
Enfoque principal	Conversión tácito/explícito	Apertura de flujos externos	Digitalización y trazabilidad
Grado de formalización	Alto (4 fases definidas)	Bajo-medio	Bajo (estructura en desarrollo) pero adaptativo
Costos de implementación	Bajos	Medios	Altos (requiere infraestructura digital) pero puede ser altamente rentable
Escalabilidad	Media	Alta	Alta (por interoperabilidad digital)
Aplicabilidad en salud	Media	Alta	Alta (caso de simulador quirúrgico)
Protección de PI	No considera explícitamente	Parcial	Alta (uso de blockchain y analítica)

Esta comparación no busca invalidar los modelos existentes, sino mostrar cómo las pautas emergentes pueden complementar o enriquecer sus limitaciones en entornos tecnológicos actuales. Para ello se consideran además que la propuesta de modelo esté en el marco de las Normas ISO aplicables: ISO 30401 e ISO 56002

La norma ISO 30401:2018 establece los requisitos para la implementación de sistemas de gestión del conocimiento, ofreciendo un marco normativo que permite a las organizaciones gestionar el conocimiento de manera efectiva, eficiente y alineada a sus objetivos estratégicos. Por su parte, la serie ISO 56000, y en particular la ISO 56002:2019, proporciona lineamientos para la implementación de sistemas de gestión de la innovación, integrando procesos, herramientas y enfoques que facilitan la generación de valor a través de la innovación.

La integración de ambos marcos normativos permite estructurar sistemas de GC articulados con los procesos de innovación organizacional, fortaleciendo la trazabilidad, protección y valorización del conocimiento generado en proyectos de I+D+i.

3.2 Capacidades habilitadoras en el modelo propuesto

En línea con la norma ISO 30401:2018, se identifican tres capacidades habilitadoras críticas para el funcionamiento efectivo del modelo:

- Capital humano: competencias, habilidades y conocimientos del personal, así como la cultura organizacional orientada al aprendizaje, la colaboración y la innovación continua. En entornos 4.0, esto implica el desarrollo de competencias digitales, habilidades de interacción hombre-máquina y capacidades avanzadas en gestión de datos y análisis.
- Procesos: flujos de trabajo, metodologías, estándares y buenas prácticas para una gestión sistemática, trazable y adaptable del conocimiento. En la era digital, estos procesos se apoyan en automatización inteligente, BPM, plataformas colaborativas y herramientas de modelado y simulación avanzada.
- Tecnología: infraestructura digital, sistemas de información y herramientas que facilitan la captura, almacenamiento, análisis, protección y distribución del conocimiento. Incluyen tecnologías como inteligencia artificial, big data, blockchain, IoT, realidad aumentada, computación en la nube y gemelos digitales.

Estas capacidades no solo soportan la gestión del conocimiento, sino que se integran de manera transversal con los sistemas de gestión de la innovación organizacional basados en la serie ISO 56000, reforzando la transformación del conocimiento en resultados de innovación, competitividad y sostenibilidad. De esta manera, en el modelo propuesto la gestión del conocimiento se vincula a hitos críticos del proyecto, asegurando su captura, sistematización, análisis, protección y transferencia con oportunidad, calidad y valor estratégico. Esto se puede apreciar en el siguiente gráfico

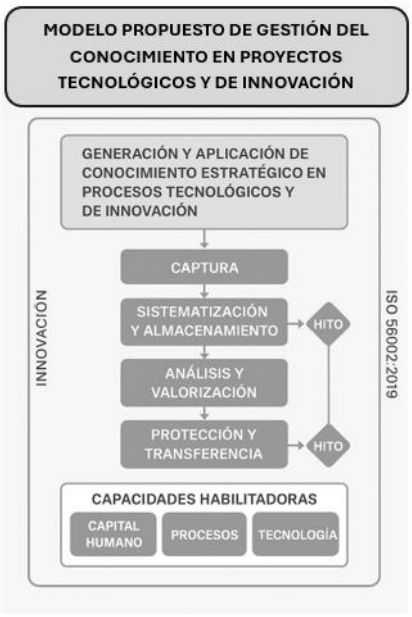


Figura 1. Modelo de Gestión del Conocimiento propuesto.

El modelo representa la gestión estratégica del conocimiento tanto incorporado como resultante de procesos tecnológicos e innovadores, asegurando oportunidad, calidad, trazabilidad y valorización como activo intangible vinculado a los objetivos del proyecto. Las capacidades habilitadoras (capital humano, procesos, tecnología) se potencian mediante tecnologías emergentes de la Industria 4.0. Asimismo, el modelo reconoce que la gestión del conocimiento debe anclarse a hitos críticos del proyecto, entendidos como momentos clave de decisión, validación, transferencia o generación de resultados parciales, alineados tanto a las fases de desarrollo tecnológico como a las expectativas de los actores involucrados.

4. CASO DE ESTUDIO: SIMULADOR DE CIRUGÍA MÍNIMAMENTE INVASIVA.

El caso de estudio se basa en el análisis de un proyecto de desarrollo tecnológico enfocado en el diseño y validación de un simulador de cirugía mínimamente invasiva, ejecutado en el ICAT-UNAM con colaboraciones en parte con otros centros de investigación, hospitales y empresas de base tecnológica.

Durante el desarrollo del proyecto, se han identificado múltiples desafíos asociados a la gestión del conocimiento, incluyendo la captura y sistematización de experiencias clínicas, la integración de tecnologías emergentes (como realidad virtual, inteligencia artificial y sensores biomédicos), y la protección de resultados mediante mecanismos de PI.

Si bien el proyecto incorporó diversas herramientas de GC, no se contó con un modelo formalizado ni con una integración sistemática de las prácticas de GC dentro del marco de la ISO 30401. No obstante, la experiencia permitió evidenciar la necesidad de contar con un enfoque estructurado que facilite la captura, protección, análisis y transferencia del conocimiento en proyectos de alta complejidad tecnológica.

La simulación en cirugía mínimamente invasiva (CMI) ha evolucionado como una herramienta crucial para la formación de cirujanos y la optimización de procedimientos quirúrgicos. Este campo ha integrado tecnologías avanzadas de inteligencia artificial (IA), realidad virtual (RV) y análisis de Big Data para mejorar la precisión y seguridad de los procedimientos (Soares & Chand, 2025). Esto facilita la transferencia de conocimientos y el desarrollo de habilidades quirúrgicas antes de que los profesionales enfrenten situaciones reales en el quirófano (Heo et al., 2024).

La Tabla 3 resume el uso de estas tecnologías en la simulación quirúrgica.

Tabla 3. Tecnologías Aplicadas a la Simulación en CMI

Tecnología	Aplicación a la simulación quirúrgica
Realidad virtual (VR)	Permite a los cirujanos practicar procedimientos con modelos anatómicos en simulaciones 3D. Entrenamiento en escenarios con complicaciones o emergencias quirúrgicas. Planificación de estrategias quirúrgicas para llevar a cabo cirugías complejas simuladas.
IA y Machine Learning	Analiza el desempeño del usuario a partir de los datos capturados en simulaciones y proporciona retroalimentación en tiempo real. Permite Clasificar a los cirujanos a partir de su experiencia quirúrgica.

Tecnología	Aplicación a la simulación quirúrgica
Big Data	Recopila la información del desempeño de cirujanos con diferente nivel de experiencia quirúrgica, durante múltiples simulaciones para mejorar el entrenamiento médico. Permite identificar nuevas variables para evaluar el desempeño del cirujano. Permite detectar tendencias en las trayectorias comunes de los cirujanos durante tareas quirúrgicas específicas.
Blockchain	Protege los avances en simulación y garantiza la autenticidad de innovaciones médicas. Protege la información de los cirujanos participantes durante la validación de nuevas tecnologías en simulación.

4.1 Aplicación de Estrategias de Gestión del Conocimiento en el proyecto

A continuación, se describe la aplicación de las estrategias de gestión del conocimiento (GC) implementadas en el proyecto, articuladas en las principales etapas del ciclo de GC:

Creación y captura del conocimiento: Durante la fase de desarrollo, se generaron diversos documentos, tablas de cálculo, presentaciones y reportes utilizando herramientas de Google, apoyándose en la nube (Google Drive) para el almacenamiento de información crítica vinculada al diseño, pruebas y calibraciones de sensores. Adicionalmente, se implementó la plataforma colaborativa Trello como espacio de trabajo para la gestión de tareas, documentación técnica y seguimiento de actividades, facilitando la captura estructurada del conocimiento generado durante el desarrollo del simulador.

Sistematización y almacenamiento: Para organizar la información técnica del simulador, se definió una nomenclatura estandarizada de componentes, asignando códigos o números de parte que permitieron establecer una estructura documental eficiente. Esta información fue gestionada en Google Drive como plataforma interoperable, permitiendo su integración con otras herramientas de gestión como Rayyan y Covidence, optimizando la trazabilidad y accesibilidad del conocimiento entre los diferentes actores del proyecto.

Transferencia y escalamiento: La comunicación y coordinación interinstitucional fueron fortalecidas mediante Trello, asegurando la visibilidad de los avances y la documentación compartida. Paralelamente, se inició el proceso de protección industrial de la innovación, buscando establecer vínculos con el sector productivo y sentar las bases para implementar el modelo de triple hélice, donde la universidad genera el conocimiento, la industria lo transforma en productos o servicios, y el gobierno regula y facilita el entorno de mercado.

Análisis y valorización del conocimiento: El uso combinado de Trello y herramientas de análisis de datos basadas en inteligencia artificial permitió monitorear el avance del proyecto, identificar cuellos de botella en procesos de pruebas de prototipos y proponer mejoras en los ciclos de diseño y manufactura. Este enfoque basado en la valorización del conocimiento permitió no solo optimizar procesos, sino también generar activos intangibles con potencial de protección y transferencia.

Como resultado de la gestión sistemática del conocimiento en el proyecto, se logró no solo el desarrollo técnico del simulador, sino también la formalización de tres protecciones de propiedad intelectual, la reducción aproximada del 20% en el tiempo de integración de componentes tecnológicos, el fortalecimiento de la colaboración interinstitucional entre cuatro organizaciones y la detección temprana de riesgos en fases de validación clínica. Estos resultados refuerzan la aplicabilidad del modelo propuesto como herramienta estratégica para sistematizar, proteger y valorizar el conocimiento en proyectos de alta complejidad tecnológica, contribuyendo al logro de objetivos estratégicos y a la generación de activos intangibles protegibles y transferibles.

Estos resultados refuerzan la aplicabilidad del modelo propuesto como herramienta para sistematizar, proteger y valorizar el conocimiento en proyectos de alta complejidad tecnológica, contribuyendo al logro de objetivos estratégicos y a la generación de activos intangibles protegibles y transferibles.

Ya en la fase de aplicación de los resultados del desarrollo, la gestión del conocimiento en el simulador de cirugía mínimamente invasiva (CMI) se fundamenta en la captura, almacenamiento, análisis y protección de datos quirúrgicos generados durante los procedimientos simulados. En este contexto, la inteligencia artificial (IA) desempeña un papel clave al facilitar la creación de modelos computacionales de simulación quirúrgica, permitiendo predecir resultados, optimizar estrategias operatorias y analizar patrones de desempeño, lo que contribuye a mejorar la toma de decisiones clínicas en tiempo real (Bikia et al., 2025; Soares & Chand, 2025). Asimismo, la IA permite la clasificación automatizada de cirujanos según su nivel de experiencia (Pérez-Escamirosa et al., 2020), el desarrollo de sistemas de tutoría quirúrgica asistida por algoritmos inteligentes, y la integración de modelos de realidad aumentada, fortaleciendo la formación quirúrgica mediante experiencias personalizadas y de alto valor didáctico (Akand et al., 2024; Vieira et al., 2025).

En paralelo, la tecnología blockchain ha sido incorporada para garantizar la seguridad, integridad y trazabilidad de los registros quirúrgicos y de los datos generados en las simulaciones, asegurando su protección frente a usos no autorizados y aportando confiabilidad a la información gestionada en entornos colaborativos (Ølnes et al., 2017). Esta integración refuerza la gestión documental y la protección de la propiedad intelectual generada en el desarrollo del simulador, al tiempo que facilita la interoperabilidad de datos con otras plataformas, promoviendo un ecosistema de innovación abierto, seguro y transparente.

No obstante, persisten desafíos relevantes asociados al costo de los sistemas avanzados de simulación, la resistencia al cambio en la comunidad quirúrgica, y la necesidad de establecer estándares de interoperabilidad que permitan la integración plena de los datos generados en simulación con registros clínicos electrónicos y otras fuentes de conocimiento médico (Khene et al., 2024; Nassar et al., 2024; Ciotti et al., 2024).

4.2 Documentación del proyecto y Protección de la Propiedad Intelectual del Simulador

Uno de los retos más importantes en proyectos de innovación es la protección de la propiedad intelectual (PI). La digitalización y la globalización han facilitado la transferencia de conocimiento, pero también han aumentado los riesgos de apropiación indebida de innovaciones. En el caso de estudio se han usado herramientas de inteligencia artificial y machine learning para realizar ejercicios analíticos de patentes, aprovechando la accesibilidad de las bases de datos de patentes y documentos académicos. También se aprovecha la forma de cómo está organizad la información de patentes bajo la Clasificación Internacional de Patentes (CIP o IPC en inglés) que rige prácticamente en todos los países del mundo (Sujonitzky & López, 2024).

Con la aplicación de estrategias de búsqueda y análisis de información basadas en GC se logró establecer la actividad inventiva y la novedad del simulador. De esta manera, el uso de la información de las patentes, además de ser la base para establecer los preceptos de novedad y actividad inventiva para las solicitudes de patente, permite mediante la analítica detectar tendencias tecnológicas, facilitando decisiones estratégicas en I&D (Matani, 2024).

En este sentido se han usado para identificar y monitorear las tendencias tecnológicas en la existencia de estos simuladores para el entrenamiento en varios tipos de cirugías, desde los elementos más básicos y fundamentales hasta los más sofisticados. Siendo esto importante para el desarrollo de los simuladores en países y sistemas de formación médica con pocos recursos y no solo en las naciones más avanzadas. Estos avances han permitido que instituciones de investigación y empresas con áreas de I&D sean más eficientes en la gestión del conocimiento y en la protección de sus innovaciones. La siguiente Tabla 4 presenta un resumen de los diferentes aspectos a ser considerados del caso descrito:

Tabla 4. Resumen del caso analizado

Aspecto	Descripción
Estrategias de GC aplicadas	• Creación, captura, sistematización y almacenamiento de conocimiento técnico y clínico • Uso de plataformas colaborativas (Google Drive, Trello • Documentación estructurada y gestión documental interoperable
Tecnologías habilitadoras integradas	• IA: análisis de datos clínicos, modelos predictivos tutoría quirúrgica automatizada, clasificación de cirujanos, analítica de patentes • Blockchain: trazabilidad, integridad y protección de datos, registros y configuraciones, fortaleciendo la gestión documental para la PI
Beneficios observados	• Reducción del 20% en tiempo de integración tecnológica • Formalización de tres modos de propiedad intelectual, además de los productos académicos • Incremento de la colaboración interinstitucional • Mejora en la toma de decisiones clínicas y optimización de la formación quirúrgica mediante la IA. • Mayor y confianza en la gestión de la PI gracias a bolckchain
Desafíos observados	• Costos elevados de sistemas de simulación, no solo en el desarrollo sino en la operación misma • Resistencia cultural al uso de simuladores en la formación quirúrgica • Necesidad de desarrollar estándares de interoperabilidad para integrar datos simulados con registros clínicos electrónicos. • Sistematización continua del conocimiento generado en el desarrollo y operación del simulador

5. CONCLUSIONES

El modelo propuesto aporta un marco conceptual y funcional para la gestión estratégica del conocimiento en proyectos tecnológicos e innovadores, integrando elementos normativos de la ISO 30401 y la ISO 56002, y adaptándolos a contextos de alta complejidad y generación de propiedad intelectual. Su aplicación preliminar en el caso del simulador de cirugía mínimamente invasiva permitió validar su pertinencia y operatividad, mostrando beneficios concretos en eficiencia, protección de PI y colaboración interinstitucional.

Estos resultados refuerzan el valor del modelo como herramienta para sistematizar, proteger y valorizar el conocimiento generado en proyectos de alta complejidad tecnológica, contribuyendo a mejorar la productividad, la toma de decisiones estratégicas y la apertura de oportunidades de colaboración y transferencia de activos intangibles (Morales-Lechuga, 2024).

No obstante, la experiencia documentada también evidencia las limitaciones operativas y estructurales que enfrentan actualmente muchos grupos académicos y de investigación en nuestro país, quienes, a pesar de contar con capacidades y habilidades para utilizar plataformas digitales, e incluso tenerlas limitadas o inexistentes, enfrentan restricciones presupuestales y de infraestructura que limitan la adopción de tecnologías habilitadoras más avanzadas, como blockchain o sistemas de inteligencia artificial especializados.

Este escenario coincide con lo señalado por Sujonitzky y López (2024), quienes destacan la necesidad urgente de desarrollar capacidades institucionales y políticas públicas que promuevan la adopción efectiva de estas tecnologías para evitar el ensanchamiento de la brecha digital frente a países desarrollados. Además, estudios recientes (Dawodu et al., 2024; Bikia et al., 2025) refuerzan la idea de que la integración intensiva de tecnologías emergentes en la gestión del conocimiento y la innovación ya constituye una práctica consolidada en ecosistemas avanzados, acelerando la generación de valor y competitividad global.

Esta situación refuerza la necesidad de impulsar políticas públicas, programas de financiamiento y esquemas de colaboración que faciliten la integración efectiva de estas tecnologías en proyectos de innovación tecnológica, ya que, aunque su adopción representa inversiones iniciales significativas, los resultados demuestran que pueden ser altamente redituables al potenciar la productividad, la eficiencia, la protección estratégica del conocimiento y la valorización de resultados (Morales-Lechuga, 2024). No atender esta brecha tecnológica solo contribuiría a ampliar las

desigualdades frente a entornos académicos y empresariales de países desarrollados.

En este sentido, tecnologías emergentes como blockchain e inteligencia artificial emergen como habilitadores estratégicos dentro de los procesos de gestión del conocimiento en proyectos de innovación tecnológica, especialmente bajo esquemas colaborativos. Estas tecnologías permiten garantizar la trazabilidad, integridad y seguridad de los registros de información, aportar confiabilidad a la documentación de avances, resultados e hitos críticos, así como mejorar la toma de decisiones estratégicas y operativas. Su integración en el modelo propuesto contribuye a consolidar una gestión del conocimiento y de la innovación más robusta, eficiente y alineada no solo a principios conceptuales, sino también a marcos normativos internacionales vigentes, como los establecidos por las normas ISO (ISO 30401:2018; ISO 56002:2019).

6. AGRADECIMIENTOS

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la DGAPA-UNAM, con número de proyecto IT201924.

7. REFERENCIAS

Abubakar, A. M., Elrehail, H., Alatailat, M. A., & Elçi, A. (2019). Knowledge management, decision-making style and organizational performance. *Journal of Innovation & Knowledge*, *4*(2), 104-114. https://doi.org/10.1016/j.jik.2017.07.003

Akand, M., Joniau, S., & Van der Aa, F. (2024). *Towards Better Stratification of Non-Muscle-Invasive Bladder Cancer*. Phd thesis. Disponible en: lirias.kuleuven.be.

Alavi, M., & Leidner, D. E. (2001). Knowledge management and knowledge management systems: Conceptual foundations and research issues. *MIS quarterly*, 107-136. https://doi.org/10.2307/3250961

Andreeva, T. and Kianto, A. (2012), "Does knowledge management really matter? Linking knowledge management practices, competitiveness, and economic performance", *Journal of Knowledge Management*, Vol. 16 No. 4, pp. 617-636. https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1108/13673271211246185.

Bikia, V. V., Adamopoulos, D., Roffi, M., Rovas, G., Noble, S., Mach, F., & Stergiopulos, N. Testing an inverse modeling approach with gradient boosting regression for stroke volume estimation using patient thermodilution data. *Frontiers in Artificial Intelligence*, *8*, 1530453. https://doi.org/10.3389/frai.2025.1530453

Burstall, R., & Clark, B. (2017). Blockchain, IP and the fashion industry. *Managing Intell. Prop.*, *266*, 9. https://research-ebsco-com.pbidi.unam.mx:2443/linkprocessor/plink?id=412c0927-d866-35f0-ab98-72c311d7d8e7. Accesso: 19 marzo 2025

Ciotti, F., John, R., Katic Secerovic, N., Gozzi, N., Cimolato, A., Jayaprakash, N., ... & Raspopovic, S. (2024). Towards enhanced functionality of vagus neuroprostheses through in silico optimized stimulation. *Nature Communications*, *15*(1), 6119. https://doi.org/10.1038/s41467-24-50523-6

Correia, A., Cruz, R., & Gonçalves, R. (2020). Blockchain-Based Knowledge Management Systems: A Comprehensive Overview. *IEEE Access*, 8, 211947-211960. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3039994

Cortés, C. B. Y., Landeta, J. M. I., Chacón, J. G. B., Pereyra, F. A., & Osorio, M. L. (2017). El entorno de la industria 4.0: implicaciones y perspectivas futuras. Conciencia tecnológica, (54). https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94454631006

Chesbrough, H. W. (2003). *Open innovation: The new imperative for creating and profiting from technology*. Harvard Business Press.

Davenport, T. H., & Prusak, L. (1998). *Working knowledge: How organizations manage what they know*. Harvard Business Press.

Dawodu, O., Allen, M. N., Ratan, R., & Opoku-Anane, J. (2024). Enhancing Knowledge and Confidence in Chronic Pelvic Pain Management: The Impact of Simulation Training. *Journal of Minimally Invasive Gynecology*, *31*(11), S57. https://doi.org/10.1016/j.jmig.2024.09.211

Ghasemaghaei, M., & Calic, G. (2019). Does big data enhance firm innovation competency? The mediating role of data-driven insights. *Journal of Business Research*, *104*, 69-84. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.006

Heo, K., Cheng, S., Joos, E., & Joharifard, S. (2024). Use of innovative technology in surgical training in resource-limited settings: A scoping review. *Journal of Surgical Education*, *81*(2), 243-256. https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2023.11.004

ISO, (2018). *ISO 30401:2018 Knowledge management systems — Requirements.* International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/68683.html

ISO, (2020). *ISO 56000:2020 Innovation management — Fundamentals and vocabulary.* International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/68221.html

Jarrahi, M. H., Askay, D., Eshraghi, A., & Smith, P. (2023). Artificial intelligence and knowledge management: A partnership between human and AI. *Business Horizons*, *66*(1), 87-99. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2022.03.002

Khene, Z. E., Tachibana, I., Bhanvadia, R., Ausmann, H., Margulis, V., & Lotan, Y. (2024). BCG therapy for bladder cancer: Exploring patient experiences and concerns through artificial intelligence-based social media analysis. *Bladder Cancer*, *10*(4), 290-299. https://doi.org/10.1177/23523735241304907

Lemieux, V. L. (2016). *Trusting records: Is blockchain technology the answer?* Records Management Journal, 26(2), 110-139. https://doi.org/10.1108/RMJ-12-2015-0042

Matani, A. G. (2024). Industry 4.0 and 5.0 towards enhanced productivity and competitiveness. In *Industry 4.0 Concepts, Processes and Systems* (pp. 61-76). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003246466

Montecchi, M., Plangger, K., & Etter, M. (2019). It's real, trust me! Establishing supply chain provenance using blockchain. *Business Horizons*, *62*(3), 283-293. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2019.01.008

Morales-Lechuga, V.M. (2024). Productivity of technological projects and management of their value as technological and intellectual property intangible assets. *Tecnología y Ciencia Aplicada.* Volumen 7, Núm. 1, Enero – junio 2024. ISSN: 2992-833831. Disponible en: https://jcyta.cenidet.tecnm.mx/revistas/jcyta/12-Vol_7_Num_7_Enero-Junio_2024.pdf

Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A Human-Centric Solution. *Sustainability*, *11*(16), 4371. https://doi.org/10.3390/su11164371

Nassar, A., Vérité, F., Pechereau, F., & Vitrani, M. A. (2024). Assistance by adaptative damping on a complex bimanual task in laparoscopic surgery. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, *19*(5), 929-938. https://doi.org/10.1007/s11548-024-03082-6

Nonaka, L., Takeuchi, H., & Umemoto, K. (1996). A theory of organizational knowledge creation. *International journal of technology Management*, *11*(7-8), 833-845. https://doi.org/10.1504/IJTM.1996.025472

O'Dair, M. (2019). Distributed Creativity: How Blockchain Technology Will Transform the Creative Economy. Springer, Cham, 65-90. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00134-8).

Ofori-Boateng, R., Aceves-Martins, M., Wiratunga, N., & Moreno-Garcia, C. F. (2024). Towards the automation of systematic reviews using natural language processing, machine learning, and deep learning: a comprehensive review. *Artificial intelligence review*, *57*(8), 200. https://doi.org/10.1007/s10462-024-10844-w

Ølnes, S., Ubacht, J., & Janssen, M. (2017). Blockchain in government: Benefits and implications of distributed ledger technology. *Government Information Quarterly*, *34*(3), 355-364. https://doi.org/10.1016/j.giq.2017.09.007

Pérez-Escamirosa, F., Alarcón-Paredes, A., Alonso-Silverio, G.A. et al. Objective classification of psychomotor laparoscopic skills of surgeons based on three different approaches. *Int J CARS* 15, 27–40 (2020). https://doi.org/10.1007/s11548-019-02073-2

Paliwal, M., Dikkatwar, R., Chatradhi, N., Valeri, M. (2024). Evolution of Research in *Knowledge Management and Competitive Advantage*. In: *Valeri, M. (eds) Knowledge Management and Knowledge Sharing*. Contributions to Management Science. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37868-3_1

Santos, M. Y., e Sá, J. O., Andrade, C., Lima, F. V., Costa, E., Costa, C., ... & Galvão, J. (2017). A big data system supporting bosch braga industry 4.0 strategy. *International Journal of Information Management*, *37*(6), 750-760. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.07.012

Soares, A. S., & Chand, M. (2025). Why we should be sharing our operations: a game theoretic analysis of surgical learning. *medRxiv*, 2025-02.

Sujonitzky, G. A., & López, I. (2024). Acerca de las patentes: cómo se constituyen y cómo buscar información tecnológica. In *Ciclo de talleres para investigadores UNLP (Universidad Nacional de La Plata, 23 de agosto de 2024)*. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/170332

Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Artificial intelligence and knowledge management: Impacts, benefits, and implementation. *Computers*, *12*(4), 72. https://doi.org/10.3390/computers12040072

Van Rossum, J. (2018). *Blockchain for research: perspectives on a new paradigm for scholarly communication.* Digital Science Report. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.5607778.v1

Vieira, B. S., Silva, E. M., & Chaves, A. A. (2025). Random-Key Algorithms for Optimizing Integrated Operating Room Scheduling. *arXiv preprint arXiv:2501.10243*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.10243

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Impact of Interconnect Crossings on the Performance of Rotary Traveling-Wave Oscillator Arrays

Rogelio Manuel Higuera González[1] *
Benjamín Sánchez Martínez[1] ** **Mónico Linares Aranda**[2] ***

* *Tecnológico Nacional de México campus Ixtapaluca, Ixtapaluca, México (e-mail: rogelio.hg1@ixtapaluca.tecnm.mx).*
** *Tecnológico Nacional de México campus Ixtapaluca, Ixtapaluca, México (e-mail: benjaminsanchezmartinez004@gmail.com).*
*** *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), San Andres Cholula, México, (e-mail: mlinares@inaoep.mx)*

Abstract: Rotary Traveling-Wave Oscillator Arrays (RTWO-ROAs) constitute an efficient alternative for the generation and distribution of high-frequency signals in integrated circuits. However, the presence of metal crossings in CMOS technology —including the Möbius crossing— can modify their electrical parameters and compromise synchronization among oscillators. In this work, the impact of different metal crossings in arrays of five RTWOs was evaluated through 3D electromagnetic simulations in Keysight EMPro and validated using distributed RLC models in Synopsys HSPICE. The results show that the variations introduced in the RLC parameters generate changes of less than 0.25% in the oscillation frequency of an individual RTWO, in which only the Möbius crossing is present, and differences of up to 78 MHz in the complete array (ROA), equivalent to less than 2% due to the larger number of crossings. Nevertheless, a stable phase synchronization of 22.5° was maintained, since each signal loop introduces 180° and each RTWO includes eight compensation stages. Based on the simulation results across the different metal layers, it is concluded that the crossing implemented in metal 5 represents the most convenient option due to its simplicity of implementation and reliable performance.

Keywords: RTWO, ROAs, Möbius Crossing, Metal Interconnects, EMPro Simulation, HSPICE.

1. INTRODUCCIÓN

La generación y distribución de señales de reloj a altas frecuencias constituye un desafío fundamental en los sistemas digitales modernos, donde es necesario minimizar el consumo de potencia y garantizar baja inestabilidad de fase. Entre las diferentes arquitecturas propuestas, los Osciladores de Onda Viajera Rotatoria (RTWO, por sus siglas en inglés) se han consolidado como una alternativa eficiente debido a su capacidad de operar con reducidas pérdidas y mantener una sincronización precisa en aplicaciones de muy alta frecuencia (del orden de los GHz).

Los RTWOs emplean líneas de transmisión diferenciales dispuestas en forma de anillo para producir una onda viajera rotatoria. Dichas líneas de transmisión se implementan utilizando las capas de interconexión metálica disponibles en la tecnología CMOS, que normalmente se emplean para conectar transistores dentro de los circuitos integrados. Al interconectar varios de estos osciladores se forman arreglos (ROAs), los cuales permiten mejorar la distribución de la señal y reducir el *jitter*. Sin embargo, la implementación física de los ROAs requiere el uso de cruces metálicos en el *layout* (conexiones mediante *vías* entre distintos niveles de metal), los cuales pueden modificar los parámetros equivalentes de resistencia, inductancia y capacitancia (RLC) de las líneas de transmisión, afectando así la frecuencia de oscilación y la sincronización entre osciladores.

Diversos trabajos han estudiado el desempeño de los RTWOs considerando tanto aspectos topológicos como variaciones tecnológicas. Wood et al. (2001) introdujeron los primeros arreglos de RTWOs, demostrando que es posible distribuir señales de reloj de manera eficiente mediante osciladores resonantes acoplados. Posteriormente, Yu and Liu (2007) analizaron esquemas de reducción de potencia en arreglos de gran escala, resaltando la importancia de optimizar el consumo energético en aplicaciones de alta integración. Higuera et al. (2017) reportaron el efecto de discontinuidades y variaciones geométricas en el desempeño de RTWOs en tecnología CMOS de 0.18 µm. Drake et al. (2009) demostraron la viabilidad de implementar RTWOs en nodos de 65 nm CMOS, mientras que Mesgarzadeh et al. (2013) analizaron el ruido de fase en osciladores rotatorios. Kaviani et al. (2013) propusieron redes de distribución de reloj basadas en RTWOs con mejoras en

⋆ Se agradece al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) por el acceso a su laboratorio de diseño de circuitos integrados, el cual cuenta con infraestructura computacional y software especializado empleados para realizar las simulaciones y análisis de este trabajo.

robustez. Más recientemente, Yao et al. (2018) estudiaron el modelado electromagnético de interconexiones en nodos avanzados, y trabajos como Yin et al. (2020) y Huang et al. (2021) han explorado la robustez de arreglos rotatorios y el análisis de parásitos en osciladores de alta frecuencia.

A pesar de estos avances, el impacto específico de los cruces metálicos en el desempeño de los arreglos completos de RTWOs (ROAs) ha recibido poca atención en la literatura. La mayoría de los estudios se concentran en la caracterización de un único RTWO o en análisis generales de topología, sin considerar cómo la ubicación y el nivel del cruce —incluido el cruce Möbius— influyen de manera conjunta en la frecuencia de oscilación, los parámetros equivalentes RLC y la sincronización de fase en configuraciones con múltiples osciladores. Esta falta de estudios sistemáticos abre una brecha de conocimiento relevante para el diseño de osciladores resonantes en sistemas de gran escala.

En este trabajo se aborda dicha brecha mediante un análisis comparativo del impacto de los cruces en un arreglo de cinco RTWOs (ROA) implementado en tecnología CMOS de 0.18 µm. El estudio sigue un flujo metodológico que integra simulaciones electromagnéticas tridimensionales (EMPro), extracción de parámetros equivalentes mediante una librería desarrollada en Python (PSRLC) y validación con modelos distribuidos en HSPICE. Se consideran cruces en cuatro niveles metálicos distintos, evaluando su efecto en la frecuencia de oscilación, en los parámetros RLC y en la sincronización de fase del arreglo. Los resultados muestran que los RTWO-ROAs mantienen un desempeño robusto ante variaciones en la interconexión metálica, lo que permite establecer lineamientos prácticos para la implementación confiable de osciladores resonantes en sistemas VLSI.

2. METODOLOGÍA

El análisis del impacto de los cruces en arreglos de RTWOs (ROAs) se llevó a cabo siguiendo una metodología estructurada en cuatro etapas principales: (1) diseño del RTWO y del arreglo (ROA), (2) simulación electromagnética 3D, (3) extracción de parámetros equivalentes RLC, y (4) validación mediante un simulador de circuitos eléctricos. La Fig. 1 resume el procedimiento general.

2.1 Diseño del RTWO y del ROA

El *layout* del RTWO y del ROA se realizó en el entorno MentorGraphics IC Station, utilizando la tecnología CMOS de 0.18 µm (UMC018). Los RTWOs se implementaron en configuración de anillo con geometría cuadrada, a partir de líneas de transmisión diferenciales. En este diseño, la primera capa metálica (M1) se destinó como plano de tierra o retorno, proporcionando la referencia para las líneas diferenciales, mientras que la estructura resonante principal se implementó en el metal 6 (M6), por ser el de mayor espesor y, por lo tanto, el que ofrece menores pérdidas resistivas.

Las dimensiones principales de la estructura del resonador, así como los espesores de las capas metálicas de la tecnología, se resumen en la Tabla 1.

Posteriormente, se construyó un arreglo de cinco RTWOs (ROA) en el que fue necesario introducir cruces metálicos

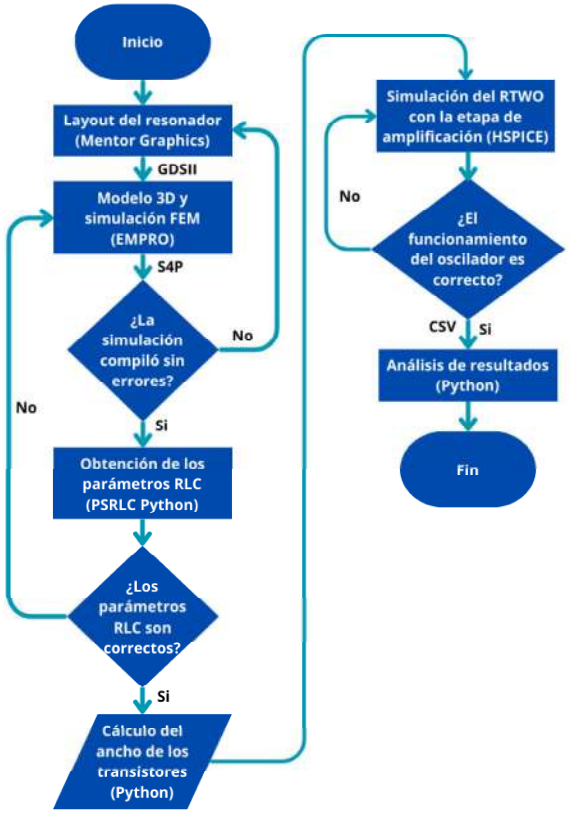


Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología seguida en el análisis del impacto de los cruces en arreglos de RTWOs (ROAs).

Table 1. Dimensiones principales del RTWO y espesores de metales en CMOS 0.18 µm.

Parámetro	Valor
Longitud del resonador (l)	880 μm
Ancho de línea (W)	10 μm
Separación (S)	20 μm
Espesor t_{m1}	0.48 μm
Espesor t_{m2}	0.58 μm
Espesor t_{m3}	0.58 μm
Espesor t_{m4}	0.58 μm
Espesor t_{m5}	0.58 μm
Espesor t_{m6}	2.06 μm

entre osciladores para lograr su acoplamiento. Dichos cruces se implementaron en distintos niveles de metal (M2–M5), incluyendo el cruce Möbius, el cual introduce un cambio de fase fundamental en la operación del arreglo. La Fig. 2 muestra el *layout* del arreglo, donde los cruces metálicos se indican encerrados en círculos rojos.

2.2 Simulación electromagnética

El *layout* se exportó a Keysight EMPro para la obtención de parámetros S mediante simulación electromagnética 3D basada en el método de elementos finitos (FEM). Los experimentos se realizaron de manera secuencial: primero considerando todos los cruces implementados en el nivel metálico 5, luego en el nivel 4, y así sucesivamente hasta el nivel 2. Este procedimiento permitió comparar de forma

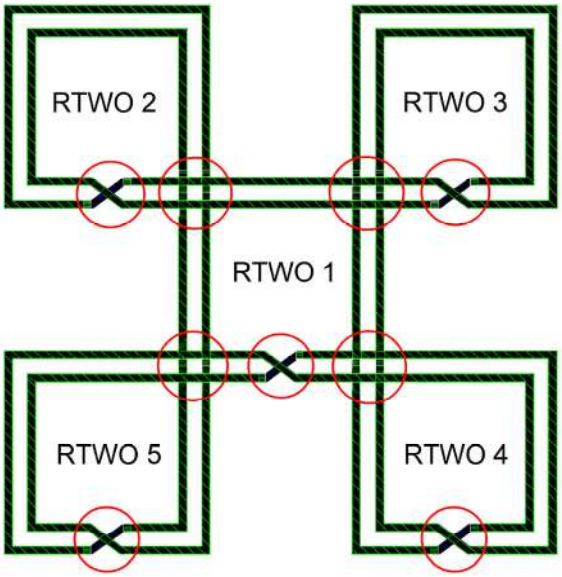


Fig. 2. Arreglo de cinco RTWOs (ROA) con cruces entre osciladores para acoplamiento. Los cruces metálicos evaluados en distintos niveles (M2–M5) se muestran encerrados en círculos rojos.

sistemática el impacto del nivel metálico de los cruces en los parámetros eléctricos equivalentes del arreglo.

La Fig. 3 ilustra las configuraciones de cruces y vías utilizadas para interconectar las líneas de transmisión entre distintos niveles de metal.

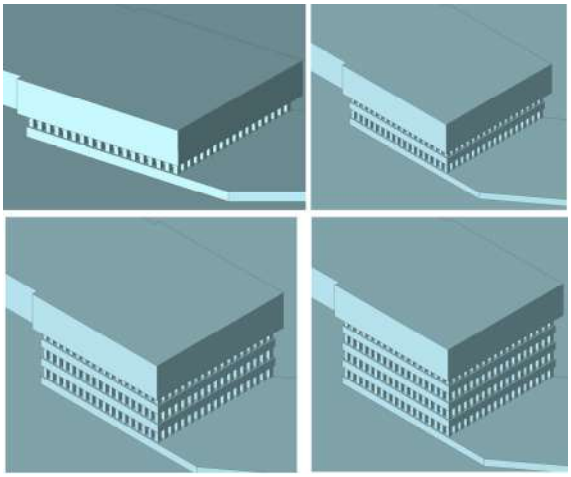


Fig. 3. Ejemplos de cruces y vías utilizados en las simulaciones electromagnéticas, considerando diferentes niveles metálicos (M2–M5).

La Fig. 4 muestra la pila de seis metales de la tecnología CMOS de 0.18 µm (ejemplo con el cruce implementado en M5), modelada en EMPro para capturar los efectos parásitos de acoplamiento y la resistencia asociada a los cruces.

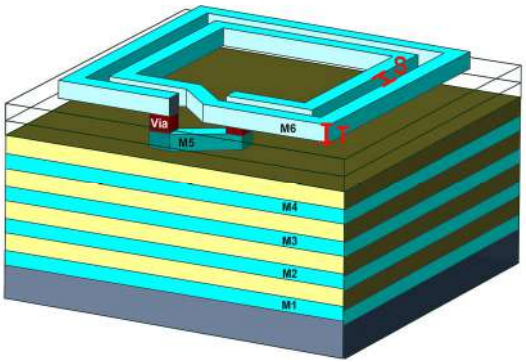


Fig. 4. Estructura del RTWO con el cruce en el metal 5 en la tecnología CMOS de 0.18 µm. Los espesores de las capas metálicas corresponden a la Tabla 1.

2.3 Extracción de parámetros equivalentes

A partir de los parámetros S obtenidos en EMPro, se empleó la librería PSRLC, desarrollada en Python por nuestro grupo de trabajo, para realizar la conversión a parámetros equivalentes de resistencia, inductancia y capacitancia (RLC).

La frecuencia de oscilación se estimó mediante la expresión clásica de un resonador LC:

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{1}$$

donde la inductancia y la capacitancia totales se expresan como:

$$L = L_{odd} \tag{2}$$

$$C = C_{odd} + C_{inv} + C_{load} \tag{3}$$

En esta formulación, L_{odd} y C_{odd} corresponden a los valores distribuidos de la estructura resonante en modo impar, C_{inv} representa la capacitancia introducida por la etapa de compensación activa (CCIP), y C_{load} corresponde a la carga externa conectada al oscilador. La geometría del RTWO y la presencia de cruces metálicos afectan directamente a L_{odd} y C_{odd}, mientras que las *vías* de interconexión incrementan las pérdidas resistivas (R). Este aumento de R puede requerir transistores de mayor tamaño en la etapa de compensación, lo cual incrementa C_{inv} y modifica la frecuencia efectiva de oscilación.

2.4 Validación en HSPICE

Con los valores obtenidos se construyó un modelo distribuido del RTWO en Synopsys HSPICE, integrando elementos RLC equivalentes y ocho etapas de compensación. De esta manera se validaron los resultados de la extracción de parámetros, observándose una diferencia menor al 1.5% entre los cálculos realizados con la librería PSRLC en Python y la simulación en HSPICE.

En la Fig. 5 se muestra el modelo distribuido equivalente de un segmento de longitud Δl del RTWO, obtenido a partir de la conversión de parámetros S a RLC. Este modelo permitió representar con precisión las pérdidas y acoplamientos parásitos de las líneas de transmisión.

Cabe destacar que las líneas de transmisión del RTWO operan en configuración diferencial (modo impar), lo que

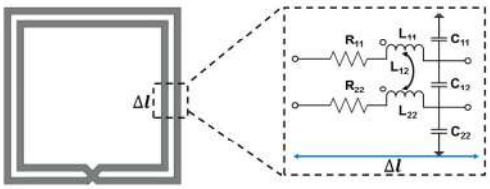


Fig. 5. Modelo distribuido equivalente del RTWO a partir de un segmento de longitud Δl. La conversión de parámetros S a RLC permitió implementar este modelo en HSPICE.

implica un desfase de 180° entre ellas. Para mantener la oscilación bajo estas condiciones, fue necesario incluir etapas de compensación implementadas mediante pares de inversores cruzados (*Cross-Coupled Inverter Pair*, CCIP). La Fig. 6 ilustra la celda CMOS utilizada como etapa activa, compuesta por transistores PMOS (MP1, MP2) y NMOS (MN1, MN2). Este bloque regenera la energía disipada en las líneas de transmisión y compensa las pérdidas resistivas, asegurando una oscilación estable en el RTWO.

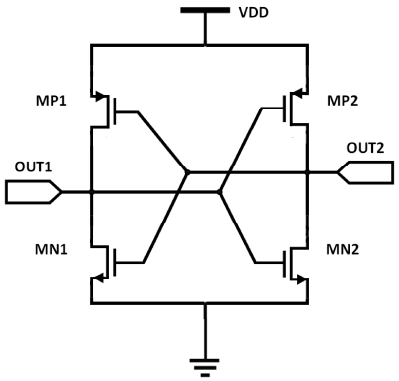


Fig. 6. Etapa de compensación utilizada en el modelo del RTWO, implementada con un par de inversores cruzados (CCIP) en tecnología CMOS 0.18 μm.

2.5 Configuración de las simulaciones

Para favorecer la reproducibilidad, se detallan los parámetros principales empleados en las simulaciones.

FEM 3D
Se utilizó un barrido en frecuencia de 0.1–15 GHz con 1001 puntos, puertos diferenciales asignados a las terminales del anillo, condición de contorno PEC a caja lejana y mallado adaptativo con refinamiento local en cruces y *vías*. El criterio de convergencia fue $\|\Delta S\|_\infty < 10^{-2}$ entre iteraciones consecutivas. Se importó la pila de metales y dieléctricos conforme a la Tabla 1, y se modelaron explícitamente las transiciones M2–M6.

Extracción PSRLC
A partir de los parámetros S de cuatro puertos se realizó la conversión a parámetros distribuidos R, L y C en modo impar, promediados en una ventana de 11 puntos alrededor de f_{osc}. La librería calcula además f_{osc} a partir de L_{odd} y C.

HSPICE
El modelo distribuido se discretizó en $N = 8$ secciones por perímetro, con ocho etapas CCIP uniformemente espaciadas (fuente $V_{DD} = 1.8$ V, $T = 27$°C). Se mantuvo fijo el dimensionamiento de transistores en todas las configuraciones para aislar el efecto de los cruces. El análisis transitorio usó paso máximo de 1 ps y ventana de 2 µs; f_{osc} se estimó por conteo de cruces por cero y verificación por FFT.

Table 2. Parámetros clave de configuración en EMPro/PSRLC/HSPICE.

Parámetro	Valor
Barrido EMPro	0.1–15 GHz, 1001 puntos
Mallado	Adaptativo, refinamiento en cruces/*vías*
Convergencia	$\|\Delta S\|_\infty < 10^{-2}$
Modo	Diferencial (modo impar)
Discretización HSPICE	8 secciones distribuidas
Etapas CCIP	8 (espaciadas uniformemente)
V_{DD}, T	1.8 V, 27°C
Extracción PSRLC	Ventana de 11 puntos en torno a f_{osc}

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

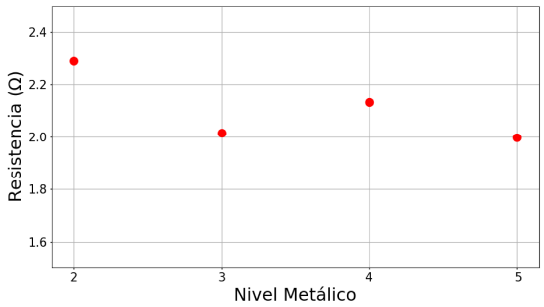
3.1 Análisis de un RTWO individual

La Fig. 7 muestra que tanto la resistencia como la inductancia equivalentes presentan variaciones mínimas entre los distintos niveles metálicos evaluados. En contraste, la capacitancia refleja un mayor impacto de los cruces, ya que las líneas de transmisión experimentan diferencias de acoplamiento capacitivo según la altura y el número de vías empleadas.

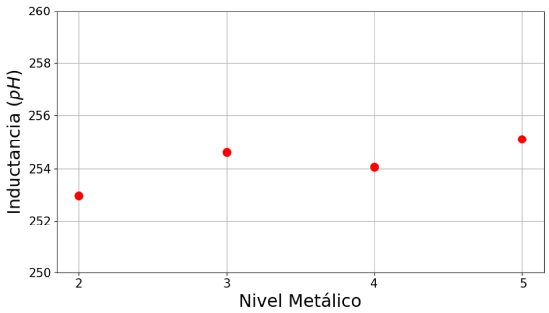
A pesar de estas variaciones en los parámetros eléctricos, la frecuencia de oscilación se mantuvo prácticamente constante, con diferencias menores al 0.25%. Este resultado se atribuye a que, en los experimentos, el tamaño de los transistores de la etapa de compensación se mantuvo fijo para todas las configuraciones, con el propósito de aislar el efecto de los cruces metálicos y del circuito resonante, evitando que las variaciones dependieran de la capacitancia introducida por la etapa activa. De este modo, se confirma que la capacitancia asociada al resonador es la más sensible al nivel metálico, mientras que la etapa de compensación determina el valor absoluto de C pero no su variación relativa en este análisis.

La Tabla 3 presenta las frecuencias de oscilación obtenidas mediante la librería PSRLC en Python y la validación en HSPICE. Se observa una variación máxima menor al 0.25% entre los distintos niveles metálicos y una diferencia inferior al 1.22% entre ambos métodos de cálculo, lo que confirma la precisión de la herramienta desarrollada.

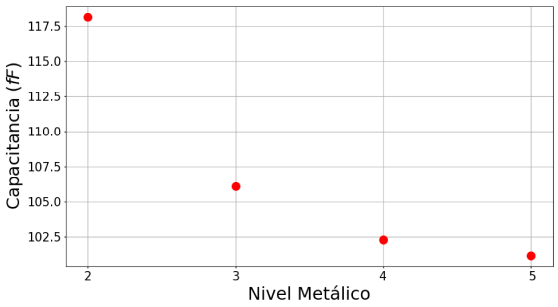
La validez del modelo también se comprobó en el dominio en el tiempo. La Fig. 8 muestra la señal de salida obtenida en HSPICE para un RTWO con cruce implementado en el metal 5. Se aprecia una oscilación estable con frecuencia de 12.193 GHz y amplitud aproximada de 1.8 V, lo que respalda la consistencia entre los parámetros extraídos, los cálculos con *PSRLC* y la simulación en el dominio del tiempo.



(a) Resistencia equivalente



(b) Inductancia equivalente



(c) Capacitancia equivalente

Fig. 7. Variación de los parámetros equivalentes R, L y C en función del nivel metálico de los cruces (M2–M5). Los valores se obtuvieron a partir de la conversión de parámetros S mediante la librería *PSRLC*.

Table 3. Frecuencia de oscilación de un RTWO individual para distintos niveles metálicos.

Nivel metálico	**f (Python)**	**f (HSPICE)**	**Variación**
M2	12.066 GHz	12.168 GHz	0.845%
M3	12.066 GHz	12.174 GHz	0.895%
M4	12.072 GHz	12.180 GHz	0.895%
M5	12.046 GHz	12.193 GHz	1.220%

3.2 Análisis de un ROA

La Tabla 4 resume las frecuencias de oscilación obtenidas para los cinco RTWOs del arreglo. Se observa una diferencia máxima de 78 MHz entre configuraciones, equivalente a menos del 2%. Aunque esta variación es mayor que la

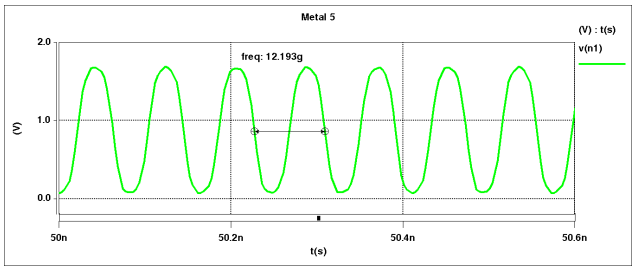


Fig. 8. Señal de salida simulada en HSPICE para un RTWO con cruce en el metal 5 (12.193 GHz).

registrada en un RTWO individual ($< 0.25\%$), el arreglo mantiene un desempeño robusto y consistente.

Table 4. Frecuencias de oscilación en un ROA de cinco RTWOs para distintos niveles metálicos [GHz].

Metal	Frecuencia [GHz]				
	RTWO1	RTWO2	RTWO3	RTWO4	RTWO5
M2	12.010	12.025	12.018	12.030	12.022
M3	12.015	12.035	12.026	12.032	12.028
M4	12.020	12.038	12.030	12.035	12.033
M5	12.025	12.040	12.033	12.037	12.036

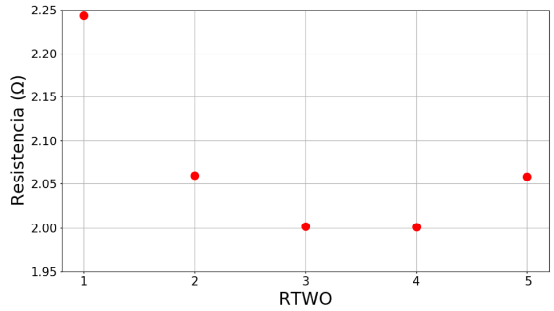
Al interconectar cinco RTWOs en un arreglo (ROA), el número de cruces metálicos aumenta y con ello se acumulan los efectos sobre los parámetros eléctricos equivalentes. La Fig. 9 muestra los valores obtenidos de resistencia, inductancia y capacitancia en el ROA al considerar cruces en el metal 5 (ya que en el se obtuvo las mayores frecuencias de oscilación). Se observa que, al igual que en el caso individual, la resistencia y la inductancia presentan variaciones reducidas, mientras que la capacitancia es la magnitud más sensible al número de cruces (RTWO1 mayor número de cruces).

La Fig. 10 muestra la sincronización de fase del ROA, en la cual cada RTWO presenta un desfase de 22.5° respecto a su vecino inmediato. Este comportamiento se debe a la inclusión de ocho etapas de compensación en cada oscilador, lo que asegura el régimen estable y confirma la robustez del acoplamiento.

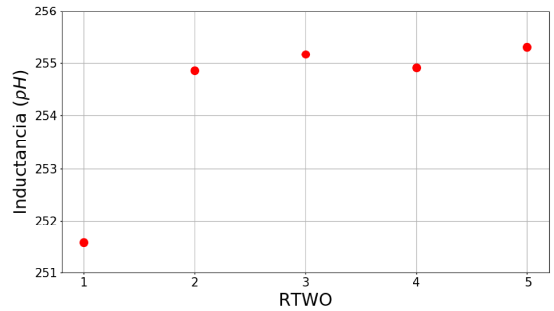
En conjunto, los resultados indican que, aunque el uso de niveles metálicos inferiores incrementa ligeramente las pérdidas resistivas y las diferencias de frecuencia entre osciladores del arreglo, el impacto global se mantiene reducido. La robustez del mecanismo de compensación asegura la sincronización de fase, confirmando que el cruce en M5 es la opción más conveniente por su baja resistencia, simplicidad de diseño y desempeño confiable.

3.3 Aplicaciones y perspectivas

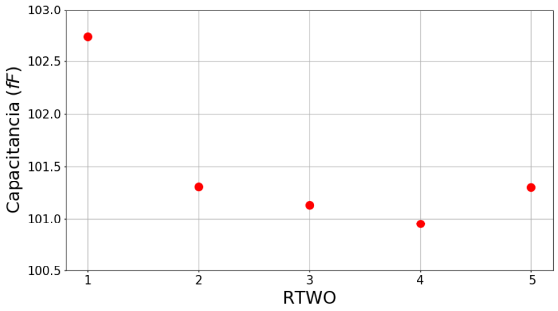
Los resultados obtenidos muestran que los RTWO-ROAs pueden emplearse de manera confiable como redes de distribución de reloj en sistemas digitales a frecuencias en el orden de los GHz. En particular, el uso del cruce en M5 simplifica el diseño y asegura estabilidad de fase, lo que resulta atractivo para aplicaciones en procesadores de baja potencia y circuitos VLSI donde la reducción de *jitter* es crítica. No obstante, el presente estudio se realizó en tecnología CMOS de 0.18 µm con pila M1–M6 y condiciones



(a) Resistencia equivalente



(b) Inductancia equivalente



(c) Capacitancia equivalente

Fig. 9. Variación de los parámetros equivalentes R, L y C en un ROA de cinco RTWOs con cruces implementados en metal 5.

nominales de operación, sin considerar variaciones PVT ni *mismatch* de dispositivos. Como trabajo futuro, se plantea replicar el análisis en nodos CMOS más avanzados (sub-65 nm), donde el mayor número de niveles metálicos y la reducción del espesor de dieléctricos pueden intensificar los efectos parásitos y modificar la robustez del arreglo.

Los resultados permiten proyectar el uso de los RTWO-ROAs en redes de distribución de reloj resonantes de bajo consumo, donde el aprovechamiento de la energía almacenada en las líneas de transmisión reduce las pérdidas dinámicas. Además, la metodología propuesta es escalable a tecnologías CMOS más avanzadas (por debajo de 65 nm), donde las menores dimensiones y las mayores velocidades de conmutación permiten alcanzar frecuencias de oscilación significativamente superiores. Por su estabilidad

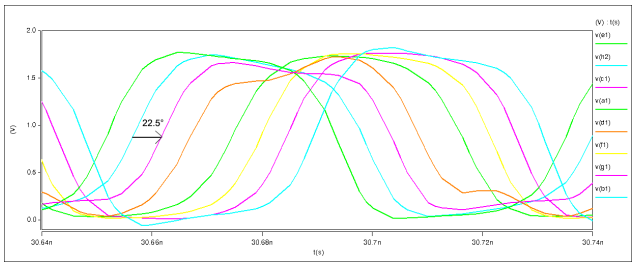


Fig. 10. Sincronización de fase en un ROA de cinco osciladores, mostrando el desfase de 22.5° entre cada RTWO.

de fase y bajo consumo, esta arquitectura también presenta potencial para aplicaciones en telecomunicaciones, particularmente en la generación de señales portadoras en el rango de GHz para sistemas inalámbricos y circuitos de radiofrecuencia integrados.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el impacto de los cruces metálicos en arreglos de Osciladores Resonantes de Onda Viajera Rotatoria (RTWO-ROAs) implementados en tecnología CMOS de 0.18 µm. Los resultados mostraron que, para un RTWO individual, la variación de frecuencia se mantiene menor al 0.25% entre cruces en distintos niveles metálicos (M2–M5), mientras que en un arreglo completo de cinco RTWOs las diferencias acumuladas alcanzan 78 MHz, equivalentes a menos del 2%. En todos los casos, la sincronización de fase se preservó en 22.5° gracias a las etapas de compensación, confirmando la robustez de la arquitectura.

El análisis de parámetros RLC indicó que la resistencia e inductancia se ven poco afectadas por la ubicación de los cruces, siendo la capacitancia la magnitud más sensible. No obstante, al mantener fijo el tamaño de los transistores de la etapa de compensación, fue posible aislar el efecto del resonador y mostrar que las variaciones derivadas de los cruces son reducidas.

En consecuencia, el cruce en metal 5 se identificó como la opción más conveniente, pues ofrece una implementación más sencilla, menores pérdidas resistivas y un desempeño confiable. Estos resultados sientan bases prácticas para el diseño de redes de distribución de reloj basadas en RTWOs, y abren la posibilidad de extender el análisis a tecnologías CMOS más avanzadas, donde la densidad de interconexiones y los efectos parásitos son aún más críticos.

REFERENCES

Wood J., T. Edwards, and S. Lipa. Rotary traveling-wave oscillator arrays: A new clock technology. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 36(11):1654–1665, 2001.

Yu Z. and X. Liu. Low-power rotary clock array design. *IEEE Transactions on VLSI Systems*, 15(1):5–12, 2007.

Higuera R. M. , M. Linares, L. Hernández, and C. Sanabria. Topology and discontinuities effect on CMOS RTWO. In *Proc. CCE*, pages 1–5, 2017.

Drake, A. et al. Resonant clocking using rotary traveling wave oscillators in 65-nm CMOS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 44(4):1137–1145, 2009.

Mesgarzadeh, B. et al. Analysis of phase noise in rotary traveling-wave oscillators. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 60(6):1508–1519, 2013.

Kaviani, K. et al. Design and implementation of rotary clock distribution networks. *IEEE Transactions on VLSI Systems*, 21(7):1232–1241, 2013.

Yao, J. et al. Electromagnetic modeling of interconnects in advanced CMOS nodes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 65(9):3722–3730, 2018.

Yin, L. et al. Robust rotary oscillator arrays for low-jitter clock generation. *Microelectronics Journal*, 100:104689, 2020.

Huang,Z et al. Interconnect parasitic analysis for high-frequency oscillators in nanometer CMOS. *Integration, the VLSI Journal*, 78:12–21, 2021.

Sanabria, C., R. M. Higuera, and M. Linares. A simple model of inter-metallic connections (vias) in CMOS resonant rotary traveling wave oscillator (RTWO). In *Proc. 14th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, pages 1–5. IEEE, 2017.

Díaz C. A. S. , M. Linares, R. M. Higuera, and F. J. De la Hidalga Wade. Impact and modeling of Möbius connection in the rotary traveling wave oscillator performance. In *Proc. IEEE 11th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS)*, pages 1–4. IEEE, 2020.

Aidoo M., N. S. Dogan, Z. Xie, H. Savci, and P. Roblin. A power-aware rotary traveling wave oscillator (RTWO) design in 0.18 µm CMOS. In *Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, pages 1–4. IEEE, 2014.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Prototype telematics system for vehicle security and tracking using an embedded system

Agustín Guzmán Cortés*. Brian Manuel González Contreras.**

Luis Francisco Barbosa Santillán*.**

**Universidad Tecnológica de Puebla, Puebla, CP 72300 / Universidad Autónoma de Tlaxcala, CP 90070 Tlaxcala, México (Tel: 222-192-54-42; e-mail: agustin.guzman@utpuebla.edu.mx).*

***Universidad Autónoma de Tlaxcala, CP 90070 Tlaxcala, México (Tel: 241-120-56-90; e-mail: brianmanuel.gonzalez@uatx.mx)*

**** Universidad Tecnológica de Puebla, Puebla, CP 72300 México (Tel: 331-560-96-98; e-mail: luis.barbosa@utpuebla.edu.mx).*

Abstract: Telematics applied to vehicle security and tracking has established itself as an indispensable tool for meeting the goal of preventing theft through real-time location and efficient fleet management. By integrating GPS, sensors, and cloud-based analytics platforms, these devices not only monitor vehicle location and status, but also optimize routes and detect risky behaviors. This improves driver and asset safety while promoting more efficient and profitable operations. Telematics devices represent a strategic ally for vehicle protection and user confidence in an increasingly dynamic environment prone to theft and incidents.

Keywords: Telematics, vehicle, security, GPS and Platforms.

1. INTRODUCCIÓN

En la última década, el robo de vehículos ha ido en firme aumento, el cual cada vez es más notable, ya que cada uno de nosotros ha sido víctima o conoce a alguien que lo ha vivido, los impactos del robo de vehículos han afectado drásticamente la seguridad social y la condición económica de todo el mundo debido a la falta de un Sistema adecuado que pueda integrar tecnología en autos comerciales, o que tiene la mayoría de la población "gama baja" (Das et al., 2021). "El proyecto se enfoca en las áreas de seguridad y tecnología del auto. Hoy día los altos índices de inseguridad están ocasionando un incremento significativo en los robos de vehículos (AMIS, 2019-2020), lo cual está mermando la economía de los mexicanos", así como de las PyMES (Pequeñas y Medianas Empresas), debido a la ausencia de un sistema efectivo antirrobo vehicular, ver Figura 1.

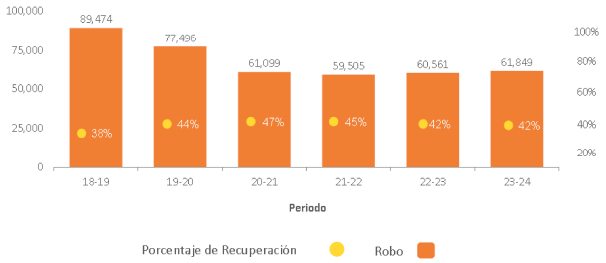


Figura 1. Robo de vehículos asegurados Fuente: (reporte 2018 a 2024, Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros)

Nota: 42% de las unidades aseguradas robadas se recuperaron

Así como también, el avance tecnológico ha sido vertiginoso. Un ejemplo temprano es el Sinclair ZX80, uno de los primeros ordenadores personales lanzado en 1980, que contaba apenas con 1 KB de memoria RAM estática y 4 KB de memoria de solo lectura. Para dimensionar el progreso, un teléfono inteligente promedio hoy dispone de aproximadamente dos millones de veces más RAM y cerca de dieciséis millones de veces más capacidad de almacenamiento. Con un costo equivalente a 531 dólares en valores de 2018, se produjeron y distribuyeron unas 100,000 unidades de este equipo, marcando un paso fundamental hacia la era digital. De manera similar, en el sector automotriz y de la telemática los cambios han sido acelerados. En términos sencillos, la telemática vehicular combina la tecnología GPS para ubicar los automóviles y las redes celulares digitales para enviar diversa información (Dibaei et al., 2020), del vehículo a sistemas de software y hardware, lo que permite registrar aspectos como la ubicación, diagnósticos mecánicos e incluso patrones de conducción.

1.1 Puerto OBD-II

El sistema OBD (On-Board Diagnostics), conocido como diagnóstico a bordo, es una tecnología diseñada para monitorear el rendimiento de los vehículos y generar reportes de autodiagnóstico, su evolución, el OBDII, se ha convertido en el estándar global en vehículos comerciales ligeros, actuando como un "cerebro" que supervisa parámetros clave del motor y otros sistemas críticos. Este protocolo es esencial

en la telemática vehicular, ya que proporciona datos en tiempo real que permiten mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y optimizar el mantenimiento preventivo.

El OBDII facilita la detección temprana de fallas, el análisis del comportamiento de conducción y el seguimiento de componentes que requieren atención antes de convertirse en un problema mayor. Esta información resulta crucial para gestores de flotas, pues transforma la gestión de vehículos de un enfoque reactivo a uno proactivo. Además, permite monitorear aspectos como velocidad, tiempo en ralentí, consumo de combustible, uso del cinturón de seguridad y condiciones del motor, mejorando tanto la seguridad como la productividad.

En cuanto a su evolución histórica, los primeros sistemas OBD surgieron en la década de 1960 con desarrollos incipientes de Volkswagen y Datsun. Posteriormente, la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE) y la Junta de Recursos del Aire de California (CARB) impulsaron la estandarización, que culminó con la obligatoriedad del OBDII en todos los vehículos fabricados en Estados Unidos a partir de 1996. Europa también adoptó su propia versión, el EOBD, desde 2001 en vehículos de gasolina y 2003 en diésel, consolidando un marco global para la regulación ambiental y la eficiencia vehicular.

1.2 CAN-BUS

El bus CAN (Controller Area Network) es un protocolo de comunicación basado en mensajes, diseñado para permitir que las unidades de control electrónico (ECU) de los automóviles y otros dispositivos se comuniquen entre sí de forma confiable, priorizando la transmisión de datos críticos sin necesidad de una computadora central. Su origen se remonta a la década de 1980, cuando Bosch, en colaboración con Mercedes-Benz, Intel y universidades alemanas, lo desarrolló como respuesta a la creciente complejidad del cableado en los vehículos. Desde entonces, el CAN se convirtió en un estándar global (Ali et al., 2022) bajo la norma ISO 11898. Entre sus principales ventajas destacan la sencillez y bajo costo de implementación, la reducción del cableado y peso del vehículo, la robustez frente a interferencias electromagnéticas, la capacidad de detección de fallas y la eficiencia en el acceso al bus mediante un sistema de prioridades. Existen variantes como CAN de baja velocidad (para diagnósticos y controles simples), CAN de alta velocidad (para sistemas críticos como frenos y motor) y CAN FD (Flexible Data-rate), que aumenta la capacidad de datos hasta 64 bytes por trama y la velocidad a 8 Mbps, siendo retrocompatible con CAN estándar. A pesar de sus fortalezas, el CAN se complementa con otros protocolos y estándares que añaden funcionalidades específicas, como SAE J1939 (camiones pesados), CANopen (robótica y control de movimiento) o XCP/CCP (calibración de ECU). Además, en los vehículos modernos convive con otras redes de comunicación según la aplicación: LIN (económico y simple, usado para sensores y actuadores básicos), FlexRay (de alta velocidad y redundancia, orientado a la seguridad y control de chasis), MOST (diseñado para sistemas de entretenimiento), Ethernet automotriz (gran ancho de banda, utilizado en diagnósticos, cámaras, LIDAR y funciones de conducción autónoma) y SENT (protocolo simple y económico para sensores unidireccionales). Por lo tanto, el bus CAN sigue siendo la columna vertebral de la comunicación en vehículos por su equilibrio entre costo, eficiencia y confiabilidad. Sin embargo, la creciente demanda de transmisión de datos para funciones avanzadas de seguridad, confort y autonomía ha impulsado la integración de buses complementarios que responden a necesidades más específicas, para mayor detalle ver la Tabla 1.

Tabla 1. Cuadro comparativo Buses de Comunicación Industriales
Fuente: Elaboración propia

Bus	Velocidad	Tamaño datos	Topología	Aplicaciones	Detección de errores	Redundancia
LIN	10-20 kbps	8 B	Bus (1 maestro + 15 esclavos)	Sensores, actuadores (luces, ventanas, espejos)	CRC 8-bit	No
CAN	1 Mbps	8 B	Bus	Carrocería, chasis, tren motriz, diagnóstico	CRC 15-bit	No
CAN FD	Hasta 8 Mbps	64 B	Bus	Sistemas avanzados, control distribuido, alto rendimiento	CRC 17/21-bit	No
FlexRay	10 Mbps	254 B	Bus / Estrella / Mixto	Seguridad crítica, control de chasis y tren motriz	CRC 24-bit	Sí
MOST	25-150 Mbps (compartido)	370 B	Anillo / Estrella virtual	Entretenimiento e info multimedia	CRC	Sí
Ethernet	100 Mbps (por nodo)	1500 B	Estrella / Árbol	Diagnóstico, cámaras, ADAS, infotainment	CRC 32-bit	No
SENT	~20 kbps	12-24 bits	Punto a punto (1 sensor-ECU)	Sensores unidireccionales (acelerador, presión)	CRC 4-bit	No

1.3 Comunicación alámbrica con plataforma arduino

Arduino ofrece diferentes tipos de comunicación alámbrica para intercambiar información con computadoras, sensores y otros dispositivos. Los seis principales son UART, I2C, SPI, CAN, RS-485 y Ethernet. Cada uno tiene características que lo hacen más adecuado en diferentes contextos.

El protocolo UART (ver Figura 2), es una comunicación serial asíncrona que utiliza los pines TX y RX. Es ampliamente usado para conectar Arduino con una PC, GPS, Bluetooth o módulos seriales. Permite el envío y recepción de datos un bit a la vez. Su principal ventaja es la sencillez y compatibilidad, aunque solo permite comunicación punto a punto y la velocidad es limitada.

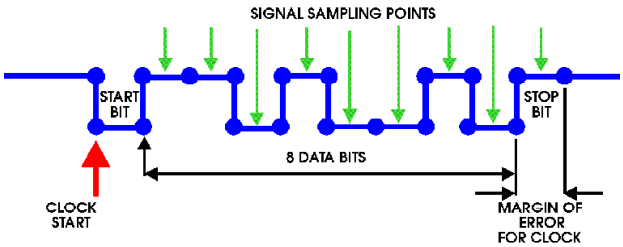


Figura 2. Secuencia de bits protocolo UART
Fuente: Asynchronous character, consultado el 6 de noviembre de 2025, controlautomaticoeducacion.com

El protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit) es un protocolo destinado a permitir que varios circuitos integrados digitales "chips", "periféricos" se comuniquen con uno o más chips

"controladores", ver Figura 3. Al igual que la Interfaz Periférica Serial (SPI), sólo esta pensada para comunicaciones de corta distancia dentro de un único dispositivo. Al igual que las Interfaces Seriales Asíncronas (como RS-232 o UARTs), sólo requiere dos cables de señal para intercambiar información.

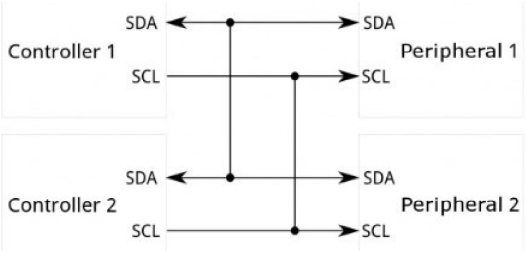


Figura 3. Diagrama de conexión del puerto I2C
Fuente: Networking and communications, consultado el 6 de noviembre de 2025, fabacademy.org

El protocolo SPI funciona utilizando cuatro señales principales: MOSI (Master Out Slave In), MISO (Master In Slave Out), SCLK (Serial Clock) y CS (Chip Select). El dispositivo maestro controla la señal de reloj, (ver Figura 4), coordinando la transmisión de datos con los periféricos. SPI es conocido por su simplicidad y velocidad, ofreciendo una velocidad de reloj personalizable y comunicación full-duplex, lo que significa que los datos pueden ser enviados y recibidos simultáneamente. A diferencia de otros protocolos de comunicación, SPI no requiere direccionamiento, lo que reduce la sobrecarga y acelera la comunicación.

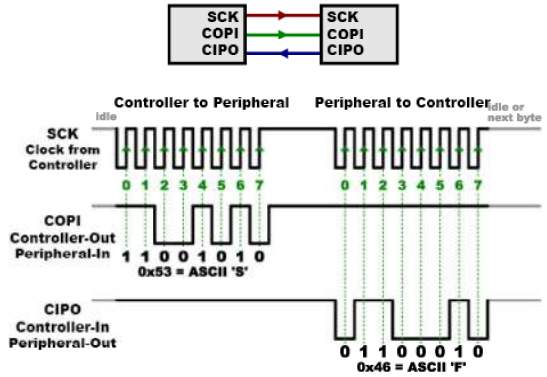


Figura 4. Línea de datos COPI y CIPO
Fuente: Serial Peripheral Interface (SPI), consultado el 6 de noviembre de 2025, learn.sparkfun.com

RS-485 (actualmente conocido como EIA/TIA-485) es una interfaz estándar de la capa física de comunicación, un método de transmisión de señales, el 1er nivel del modelo OSI (Interconexión de Sistemas Abiertos). El protocolo RS-485 fue creado para ampliar las capacidades físicas de la interfaz RS-232 (Ver Figura 5).

La conexión serie EIA-485 es realizada utilizando un cable de dos o tres hilos: un hilo de datos, un hilo con datos invertidos y, a menudo, un hilo cero (tierra, 0 V) de este modo, los transmisores y los receptores intercambian los datos a través de un cable de par trenzado de hilos rígidos de 22 o 24 AWG.

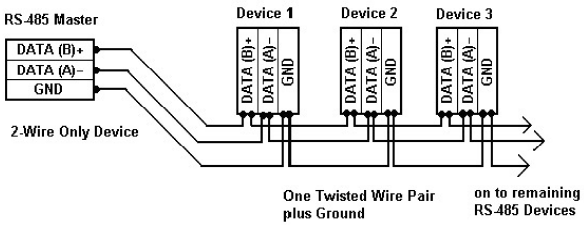


Figura 5. Línea de conexión RS-485
Fuente: 2-Wire RS-485 Connections, consultado el 6 de noviembre de 2025, gzairtech.net

TCP/IP es un protocolo de enlace de datos que se usa en Internet para que los ordenadores y otros dispositivos envíen y reciban datos. TCP/IP son las siglas en inglés de Transmission Control Protocol/Internet Protocol (protocolo de control de transmisión/protocolo de Internet). Posibilita que los dispositivos conectados a Internet se comuniquen entre sí en varias redes. Desarrollado en los 70 por DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency en EE. UU.), TCP/IP empezó como uno de muchos protocolos de Internet.

Tabla 2. Cuadro comparativo protocolos alámbricos
Fuente: Elaboración propia

Protocolo	Conexión	Velocidad	Ventajas	Limitaciones
UART	TX, RX	9600 - 115200 bps (típico)	Sencillo, ampliamente compatible	Solo punto a punto, velocidad limitada
I2C	SDA, SCL	100 kbps (standard), 400 kbps (fast)	Conecta múltiples dispositivos con pocos pines	Velocidad moderada, sensible a cables largos
SPI	MISO, MOSI, SCK, SS	Hasta 10+ Mbps	Alta velocidad, comunicación full-dúplex	Requiere más pines y una línea SS por esclavo
CAN	CAN_H, CAN_L	Hasta 1 Mbps	Robusto, ideal en automoción e industria	Requiere módulo externo
RS-485	A, B (diferencial)	Hasta 10 Mbps (dependiendo de distancia)	Largas distancias, resistente al ruido	Necesita transceptor externo
Ethernet	Cable RJ45 (Ethernet Shield)	10/100 Mbps	Alta velocidad, acceso a redes e Internet	Mayor consumo y hardware adicional

1.4 Comunicación inalámbrica con arduino/ESP32

A diferencia del Bluetooth, que siempre está activo, el BLE (Bluetooth Low Energy) permanece en modo de suspensión constantemente, excepto cuando se inicia una conexión. Esto reduce considerablemente su consumo de energía (Bluetooth SIG, 2022). El BLE consume aproximadamente 100 veces menos que el Bluetooth (según el caso de uso). Además, el BLE admite no solo la comunicación punto a punto, sino también el modo de difusión y la red en malla. Gracias a sus propiedades, el BLE es ideal para aplicaciones que requieren el intercambio periódico de pequeñas cantidades de datos en una pila de botón. Por ejemplo, el BLE es de gran utilidad en

los sectores de la salud, el fitness, el rastreo, las balizas, la seguridad y la domótica.

Características Principales

- Bajo consumo de energía
- Transmisión de corta distancia
- Ancho de banda bajo (pequeñas cantidades de datos)
- Ideal para intercambiar pequeñas cantidades de datos periódicamente.
- Admite redes punto a punto, de transmisión y de malla.

El ESP-NOW también conocido como ESP-Ahora, es un protocolo de comunicación sin conexión desarrollado por Espressif que permite la transmisión de paquetes cortos. Este protocolo permite que varios dispositivos se comuniquen entre sí de forma sencilla. Según el sitio web de Espressif, ESP-NOW es un protocolo desarrollado por Espressif que permite la comunicación entre varios dispositivos sin usar Wi-Fi. El protocolo es similar a la conectividad inalámbrica de 2,4 GHz de bajo consumo. Es necesario emparejar los dispositivos antes de que se comuniquen, una vez realizado el emparejamiento, la conexión es segura (Gayathri & Gomathy, 2022) y punto a punto, sin necesidad de protocolo de enlace.

Características Principales

- Protocolo de comunicación rápida
- Se puede transportar una carga útil de hasta 250 bytes
- Comunicación cifrada y no cifrada
- Comunicación de alcance (220 metros en campo abierto según nuestros experimentos)

Wi-Fi (Wireless Fidelity), Se pueden intercambiar datos entre placas ESP32 mediante solicitudes HTTP. Una placa actúa como servidor (punto de acceso Wi-Fi) y la otra como cliente (estación Wi-Fi). El ESP32 también puede realizar solicitudes HTTP a servicios de terceros en internet para enviar o recibir datos. Para ello, el ESP32 necesita estar conectado a una red Wi-Fi con acceso a internet. El ESP32 también puede realizar solicitudes HTTP a servicios de terceros en internet para enviar o recibir datos. Para ello, el ESP32 necesita estar conectado a una red Wi-Fi con acceso a internet.

MQTT significa Transporte de Telemetría de Cola de Mensajes. Es un sistema ligero de publicación y suscripción que permite publicar y recibir mensajes como cliente. MQTT es un protocolo de mensajería simple, diseñado para dispositivos con restricciones y bajo ancho de banda.

Para usar MQTT para intercambiar datos, se necesita un bróker MQTT que se encargue de recibir todos los mensajes, filtrarlos y publicarlos a todos los clientes suscritos. MQTT es ideal para proyectos de IoT con múltiples dispositivos.

LoRa (Long Range) es una tecnología de comunicación de datos inalámbrica que utiliza una técnica de modulación de radio que puede generarse mediante chips transceptores LoRa de Semtech. LoRa permite la comunicación a larga distancia de pequeñas cantidades de datos (lo que implica un ancho de banda bajo) y una alta inmunidad a interferencias, a la vez que minimiza el consumo de energía. Por lo tanto, permite la comunicación a larga distancia con bajos requisitos de energía.

GPS / GSM / GPRS / LTE, Puedes conectar tu placa ESP32 a un módem para enviar y recibir SMS y llamadas, y conectarte a internet con una tarjeta SIM, como lo harías con tu smartphone. Algunos módems también pueden obtener datos GPS (Global Positioning System) como latitud, longitud, altitud, fecha y hora. Hay diferentes módulos disponibles que son compatibles con el ESP32 y también hay placas ESP32 que ya vienen con un módem incorporado y todos los circuitos necesarios, a modo de resumen se presenta la Tabla 3.

Tabla 3. Cuadro comparativo protocolos inalámbricos
Fuente: Elaboración propia

Protocolo	Banda / Medio	Alcance típico	Velocidad	Consumo	Topología	Notas en Arduino / ESP32
BLE (Bluetooth Low Energy)	2.4 GHz	10–50 m	125 kbps – 2 Mbps	Muy bajo	Central – Periférico	ESP32 tiene BLE nativo; Arduino UNO usa módulos HM-10 / nRF52
Bluetooth clásico	2.4 GHz	10–100 m	~1–3 Mbps	Medio	Maestro – Esclavo	Arduino UNO: HC-05/HC-06; ESP32 también lo soporta
ESP-NOW	2.4 GHz (ESP32/8266)	30–90 m	~1 Mbps (≤250 bytes)	Bajo	P2P o multicast	Solo ESP32/ESP8266; sin router Wi-Fi
Wi-Fi (802.11 b/g/n)	2.4/5 GHz	30–100 m	10–100+ Mbps	Alto	Infraestructura (AP) o P2P	ESP32 tiene Wi-Fi integrado; UNO usa shields/módulos
MQTT	Depende del transporte (Wi-Fi, GPRS, LTE...)	Según red	Muy bajo (paquetes ligeros)	Bajo	Cliente – Servidor (Broker)	Funciona sobre TCP/IP; común con ESP32 + Wi-Fi
LoRa	Sub-GHz (433/868/915 MHz)	2–15 km	0.3–50 kbps	Muy bajo	Estrella o P2P	Arduino/ESP32 usan módulos SX127x (RA-02, RFM95)
GSM/GPRS/LTE	Bandas celulares	Cobertura de red (km's)	GPRS: <100 kbps; LTE: hasta Mbps	Medio	Celular (infraestructura operador)	Arduino UNO: SIM800L/SIM900; ESP32: SIM7600 (LTE)

1.5 Aportaciones referentes al área de interés

El artículo de (Hercog et al. 2023) presenta el diseño e implementación de herramientas educativas para el desarrollo de aplicaciones IoT basadas en el microcontrolador ESP32, un dispositivo de bajo costo, bajo consumo y con conectividad integrada Wi-Fi/Bluetooth. El proyecto se centra en un enfoque pedagógico, donde estudiantes aprenden desde lo básico de programación en Arduino IDE hasta la integración de sensores, adquisición de datos, almacenamiento en tarjetas SD y comunicación con plataformas en la nube. Para facilitar el aprendizaje, se diseñaron placas de expansión personalizadas que permiten la conexión rápida de módulos comerciales (Grove, STEMMA QT, Qwiic), para mayor detalle ver la Figura 6, además de la integración con el instrumento Analog Discovery 2, lo que posibilita probar señales analógicas y digitales en tiempo real.

Como parte de la formación, los estudiantes desarrollaron prototipos funcionales, entre ellos un sistema de monitoreo de colmenas y un dispositivo de seguimiento de fermentación de vino, ambos capaces de medir variables críticas, registrar datos y enviarlos a la nube para su análisis. Estos proyectos muestran la versatilidad del ESP32 para generar soluciones compactas, autónomas y escalables.

La aportación al sector automotriz se vislumbra en la transferencia de estas capacidades hacia sistemas de monitoreo y rastreo vehicular, mantenimiento predictivo, control de procesos y automatización de pruebas. El mismo enfoque educativo aplicado en la creación de prototipos puede emplearse en el desarrollo de sensores inteligentes para vehículos, optimización del consumo energético, telemetría en tiempo real y plataformas de movilidad conectada. Así, el trabajo no solo forma talento especializado en IoT, sino que abre oportunidades para aplicar tecnologías de bajo costo y alta eficiencia en la industria automotriz (ver Figura 6), un sector que exige innovación constante en conectividad, seguridad y eficiencia operativa.

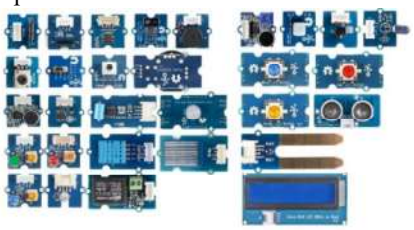


Figura 6. Ejemplo de módulos Grove
Fuente: Hercog et al. 2023

La aportación de (Chen y Tan 2015) aborda uno de los principales problemas de los dispositivos con GPS integrado: el alto consumo de energía que limita la autonomía de los equipos móviles. Para ello, los autores diseñan un modelo energético genérico de receptores GPS (ver Figura 7), capaz de identificar cuáles procedimientos de software y hardware consumen más energía durante la captura de señal, adquisición de satélites, seguimiento y cálculo de navegación. El estudio se implementó y evaluó en el receptor Namuru V2, con mediciones detalladas de voltaje, corriente y tiempos de procesamiento en cada etapa.

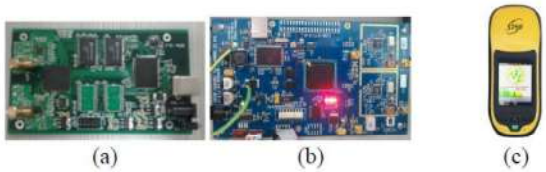


Figura 7. Tipos de Muestreadores GPS (a) Muestreador HG-SOFTGPS02. (b) Namuru. (c) Colector de datos SIG portátil S750 Fuente: (Chen y Tan 2015)

Un hallazgo clave es que el consumo energético es lineal con el número de satélites rastreados y con la longitud de datos procesados. Con base en ello, se desarrolló un algoritmo de seguimiento selectivo de satélites, que aprovecha la estabilidad temporal de las señales para rastrear solo un subconjunto representativo, reduciendo entre 20.9% y 23.1% el consumo de energía, sin afectar de manera significativa la precisión de posicionamiento (error medio cercano a 12 metros). La aportación al sector automotriz es directa y estratégica: los sistemas de navegación y telemetría en vehículos eléctricos, autónomos o conectados enfrentan el reto de optimizar la energía sin sacrificar confiabilidad en la localización, para mayor detalle ver la Figura 8. La propuesta de seguimiento selectivo puede integrarse en plataformas de infoentretenimiento, gestión de flotas o asistencia avanzada a la conducción (ADAS), permitiendo extender la vida útil de baterías, reducir costos de operación y favorecer la implementación de soluciones GPS más sostenibles. De esta forma, el trabajo no solo avanza en el campo académico, sino que sienta bases para aplicaciones automotrices más eficientes en un contexto de movilidad inteligente.

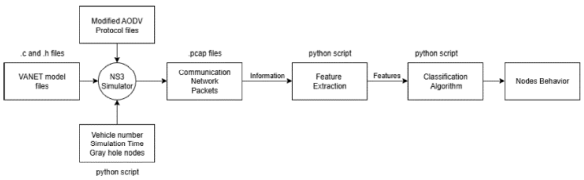


Figura 8. Flujo de extracción de características en NS-3
Fuente: (Arízaga Silva et al. 2025)

Las Redes Vehiculares Ad Hoc (VANET) facilitan la comunicación crítica para los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS), pero son vulnerables a amenazas de ciberseguridad (Abreu et al., 2024), como los ataques de Agujero Gris, en los que nodos maliciosos descartan paquetes selectivamente, comprometiendo la integridad de la red. Los métodos de detección tradicionales tienen dificultades para abordar la naturaleza intermitente de estos ataques, lo que requiere soluciones avanzadas. Este estudio (Arízaga Silva et al. 2025) propone un Sistema de Detección de Intrusiones (IDS) basado en aprendizaje automático para detectar ataques de Agujero Gris en VANET. Ver Figura 9 para mayor detalle. Métodos: Este estudio propone un Sistema de Detección de Intrusiones (IDS) basado en aprendizaje automático para detectar ataques de Agujero Gris en VANET, (Ver Figura 8). Las características se extrajeron de simulaciones de tráfico de red en NS-3 y se categorizaron en atributos basados en tiempo, paquete y protocolo. NS-3 se define como un simulador de red de eventos discretos ampliamente utilizado en la investigación de protocolos de comunicación. Se evaluaron múltiples clasificadores, incluyendo Random Forest, Support Vector Machine (SVM), Logistic Regression y Naive Bayes, utilizando métricas de precisión, recuperación y puntuación F1.

El clasificador Random Forest superó a otros, alcanzando una puntuación F1 de 0,9927 con 15 estimadores y una profundidad de 15. Por el contrario, las variantes de SVM mostraron limitaciones debido al sobreajuste, con una precisión y recuperación inferiores a 0,76. El análisis de características destacó la velocidad de transmisión y el recuento de paquetes/bytes como los más influyentes para la detección. El IDS basado en Random Forest identifica eficazmente los ataques de agujero gris, ofreciendo alta precisión y robustez. Este enfoque aborda una brecha crítica en la seguridad de VANET, mejorando la resiliencia contra amenazas sofisticadas. Futuros trabajos podrían explorar modelos híbridos o la implementación en el mundo real para validar aún más la eficacia del sistema.

Con todo lo mencionado y descrito en este capítulo introductorio se plasma la tendencia e importancia de uso de la telemetría en el sector automotriz para mejorar y optimizar el seguimiento, rastreo y localización de unidades, dentro de una categoría de funciones y aplicaciones mas amplia y ya expuesta.

2. DESARROLLO PROTOTIPO TELEMÁTICO

Para el desarrollo del prototipo telemático, se requiere primero de la siguiente lista de materiales y componentes, los cuales se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Componentes del Prototipo Telemático
Fuente: Elaboración propia

Número	Descripción	Imagen
1	ESP-WROOM-32	
2	NEO-6M Modulo GPS	
3	Antena Cerámica	
4	Cables varios	
5	Fuente de Poder	

La serie de módulos NEO-6 es una familia de receptores GPS autónomos que incorpora el motor de posicionamiento u-blox 6 (u-blox, 2022), de alto rendimiento. Estos receptores, flexibles y económicos, ofrecen numerosas opciones de conectividad en un formato miniatura de 16 x 12,2 x 2,4 mm. Su arquitectura compacta y sus opciones de alimentación y memoria hacen que los módulos NEO-6 sean ideales para dispositivos móviles alimentados por batería con limitaciones de coste y espacio muy estrictas. El motor de posicionamiento u-blox 6 de 50 canales ofrece un tiempo de primera fijación (TTFF) inferior a 1 segundo. El motor de adquisición dedicado, con 2 millones de correladores, es capaz de realizar búsquedas masivas en paralelo en tiempo/frecuencia, lo que le permite encontrar satélites al instante. Su diseño y tecnología innovadores eliminan las fuentes de interferencia y mitigan los efectos multitrayecto, lo que proporciona a los receptores GPS NEO-6 un excelente rendimiento de navegación incluso en los entornos más exigentes, ver Tabla 5. Para mayor detalle.

Tabla 5. Características principales del NEO-6M GPS

Model	Type				Supply		Interfaces				Features						
	Standalone GPS	Capture & Process	Timing & Raw Data	Dead Reckoning	1.75 - 2.0 V	2.7 - 3.6 V	UART	USB	SPI	DDC (I²C compliant)	Programmable (Flash) FW update	TCXO (KickStart)	RTC Crystal	Antenna supply and supervisor	Configuration pins	Timepulse	External interrupt / Wakeup
NEO-6G	•				•		•	•	•	•		•	•		3	1	•
NEO-6Q	•					•	•	•	•	•		•	•		3	1	•
NEO-6M	•					•	•	•	•	•			•		3	1	•

Fuente: NEO-6 u-blox 6 GPS Modules, consultado el 6 de noviembre de 2025, datasheethub.com

Posteriormente lo que, respecta a la antena, dentro de las comerciales, la antena seleccionada es una de las que cumple con las características mínimas funcionales para mucho de los proyectos descritos en diferentes sitios web, de proyectos académicos y desarrollos de IoT, para mayor detalle ver la Tabla 6.

Tabla 6. Características de la Antena Cerámica
Fuente: Elaboración propia

Descripción	Tipo
Conector	IPX o u.FL.
Tipo	Cerámica, pasiva o con Amplificador de Bajo Ruido (LNA)
Frecuencia	1575.42 MHz (frecuencia de la señal GPS L1)
Impedancia	50 Ohmios
Ganancia	Varía, pero debe ser adecuada para captar la señal GPS. Las antenas pasivas de 2 dBi o mayores son comunes
Voltaje	Si la antena tiene LNA, puede requerir alimentación de 3.3V ± 0.3V, aunque se usa pasiva

2.1 Diagrama de conexión modulo GPS

Uno de los principales temas es identificar los pines de conexión y soldar correcta y delicadamente estos pines, ya que, al ser una tarjeta doble cara, tiene pistas muy delgadas, las cuales si se exceden en la temperatura o exposición de la punta del cautín se de forman o destruyen, para mayor detalle ver la Figura 9.

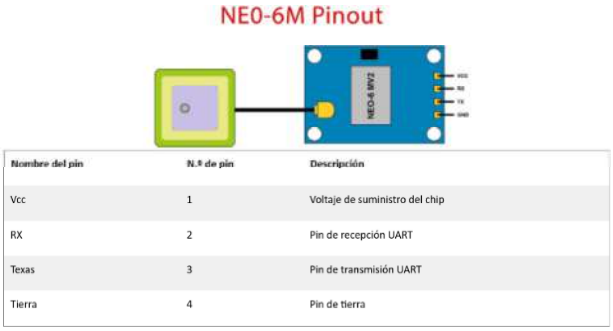


Figura 9. Pines de conexión del NEO-6M Fuente: The GPS module, consultado el 6 de noviembre de 2025, theengineeringprojects.com

Dentro de las Aplicaciones fundamentales del Módulo NEO-6M destacan:

1) Sistemas de navegación GPS
2) Posicionamiento de aeronaves.

2.2 Diagrama de conexión prototipo Telemático (Geocerca)

Con estos elementos y su correcta conexión, se busca tener el objetivo de un circuito que permita controlar una alarma dependiendo de la posición actual que este leyendo el GPS, si esta lectura se mueve 5 metros a la redonda deberá emitir una

alarma visual, con lo cual sabremos que el dispositivo en el cual está instalado el GPS se ha movido, y entonces se pueda activar otro actuador que tome acción sobre este, particularmente se busca que detenga el motor de un vehículo convencional de gama baja, para mayor detalle y claridad ver la Figura 10.

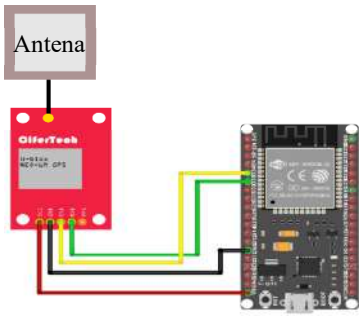


Figura 10. Diagrama eléctrico del prototipo Geocerca
Fuente: Pocket-GPS, consultado el 6 de noviembre de 2025, github.com

2.3 Aplicación compatible con el prototipo Telemático

Por temas de compatibilidad, disponibilidad de dispositivos móviles y tiempo para poder realizar una prueba con el circuito armado propuesto en la Figura 11, se optó utilizar una aplicación para Sistema iOS, la aplicación se llama "Encontrar", dicha aplicación al ser parte de la misma tienda de Aplicaciones, hace transparente la vinculación entre el dispositivo NEO-6M y el teléfono inteligente, y con otras Aplicaciones por temas de privacidad, lo detecta como posible robo y no permite su vinculación. Por el momento no se ha encontrado una aplicación en Sistema Android que permita realizar la vinculación con el módulo GPS, en la Figura 11 se muestra el icono de dicha aplicación.

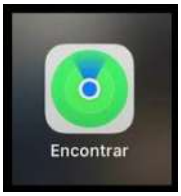


Figura 11. Icono de la aplicación iOS "Encontrar"
Fuente: App Store

2.4 Fragmento de código utilizado en el Prototipo

En la constante RANGO_METROS, se asigno el número mínimo en metros con el cual puede ser configurado el módulo GPS NEO-6M, el cual se probó y valido, como se muestra en la Figura 13, cuando el dispositivo móvil en donde están instalada la aplicación "Encontrar", está alejado a más de 5 metros de donde está instalado el modulo GPS NEO-6M se activa una alarma visual (led de color azul), y cuando el dispositivo móvil vuelve a estar cerca (dentro de la Geocerca) se apaga el led indicador (alarma).

```
#include <TinyGPS++.h>
#include <HardwareSerial.h>
#include <WiFi.h>
const char* ssid = "TU_SSID";
const char* password = "TU_PASSWORD";
TinyGPSPlus gps;
HardwareSerial gpsSerial(2); // UART2
WiFiServer server(80);
double lat_ref = 0.0, lng_ref = 0.0;
bool ref_set = false;
const double RANGO_METROS = 5.0;
```

#include <TinyGPS++ .h>: Es una librería muy popular para procesar los datos recibidos de un módulo GPS.
#include <HardwareSerial.h>: Permite usar los puertos seriales del ESP32 para comunicarse con el módulo GPS.
#include <WiFi.h>: Es la librería estándar para manejar la conexión WiFi en el ESP32.
const char ssid = "TU_SSID"; y const char* password = "TU_PASSWORD";: Aquí debes colocar el nombre y la contraseña de tu red WiFi.*
TinyGPSPlus gps;: Se crea un objeto gps para interactuar con la librería.
HardwareSerial gpsSerial(2);: Declara el puerto serial UART2 para comunicarse con el GPS, asignado a los pines 16 (RX) y 17 (TX).
WiFiServer server(80);: Inicializa un servidor web en el puerto 80 (el puerto HTTP estándar).
lat_ref, lng_ref: Variables para almacenar la latitud y longitud del punto de referencia.
ref_set: Un booleano que se usa como "bandera" para saber si el punto de referencia ya se ha establecido.
RANGO_METROS: La constante que define el radio del geofence (5.0 metros).

Figura 12. Validación código Prototipo Geocerca
Fuente: Galería propia imágenes proyecto

2.5 Trabajos futuros

Como parte de los futuros trabajos con este prototipo telemático, se tiene programado integrarlo en un vehículo compacto de gama baja, Marca Nissan Modelo Tsuru, con número de VIN: 3NIEB3IS03K506364, Estas líneas de investigación se alinean con otros desarrollos del grupo, como el diseño de sistemas de control de acceso digital (Guzmán Cortés et al., 2024a) y el control de ignición mediante huella digital (Guzmán Cortés et al., 2024b). La aplicación ya está vinculada, se está trabajando en la gestión del vehículo, ya que no puede salir de las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Puebla, debido a un tema de donación por parte del gobierno del estado y políticas de la Universidad, ver Figura 13.

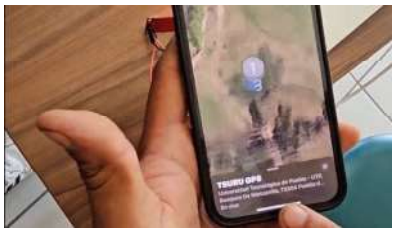


Figura 13. Vinculación de App en Vehículo Tsuru
Fuente: Galería propia imágenes proyecto

3. CONCLUSIONES

Con las pruebas realizadas al prototipo telemático, propuesto en este trabajo de investigación, se demuestra que, con el conjunto de elementos descritos en la Tabla 4, y conectados como se muestra en la Figura 10, con el código mencionado en el apartado 2.4 y las evidencias obtenidas y mostradas en la Figura 12, podemos garantizar que tenemos un prototipo

funcional telemático, que permite construir una Geocerca, de mínimo 5 metros a la redonda, de donde se encuentre conectado el módulo GPS NEO-6M, mediante una fuente de energía de entre 3 y 5 volts de dc, con lo cual se puede garantizar que mediante la vinculación con la aplicación se puede tener control sobre un dispositivo (actuador, motor, alarma auditiva, etc) y con esto aumentar la Seguridad vehicular, así como su rastreo en tiempo real.

4. ABREVIACIONES Y ACRÓNIMOS

OBD (Diagnóstico a bordo)
VIN (Número de Identificación del Vehículo)
SAE (Sociedad de Ingenieros de Automoción)
CARB (Junta de Recursos del Aire de California)
CAN (Red de Área de Controlador)
ECU (Unidad de Control Electrónico)
EDS (Hoja de Datos Electrónicos)
LIN (Red de Interconexión Local)
MOST (Sistemas de Transporte Orientados a los Medios)
LIDAR (Detección y Medición de Distancias por Luz)
SENT (Transmisión de Mordisqueo de un Solo Borde)
UART (Receptor/Transmisor Asíncrono Universal)
I2C (Circuito Interintegrado)
SPI (Interfaz Periférica en Serie)
RS-485 (Estándar Recomendado 485[Transmisión Diferencial y Multipunto])
LAN (Red de Área Local)
GPS (Sistema de Posicionamiento Global)
MOSI (Maestro Afuera, Esclavo Adentro)
MISO (Maestro Adentro, Esclavo Afuera)
SCLK (Reloj Serial)
CS (Selección de Chip)
EIA/TIA (Alianza de Industrias Electrónicas / Asociación de Industrias de Telecomunicaciones)
OSI (Interconexión de Sistemas Abiertos)
DARPA (Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa)

REFERENCIAS

Abreu, R., Simão, E., Serôdio, C., Branco, F., & Valente, A. (2024). Enhancing IoT Security in Vehicles: A Comprehensive Review of AI-Driven Solutions for Cyber-Threat Detection. AI, 5(4), 2279–2299. https://doi.org/10.3390/ai5040112

Agustín Guzmán Cortés, Francisco, L., Manuel, B., & González, R. Á. (2024). Diseño de control digital de puerta para acceso a vehículo compacto. South Florida Journal of Development, 5(6), e4053–e4053. https://doi.org/10.46932/sfjdv5n6-014

Agustín Guzmán-Cortés, Barbosa-Santillán, L. F., González-Contreras, B. M., & Álvarez-González, R. (2024). Design of digital ignition control of compact vehicle engine using fingerprint. Revista de Ingeniería Tecnológica, 8(21). https://doi.org/10.35429/jten.2024.8.21.1.7

Ali, N., Li, X., Noor-A-Rahim, M., & Khyam. (2022). An Overview of Vehicular Cybersecurity for Intelligent Connected Vehicles. https://doi.org/10.3390/su14095211

Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros (AMIS). (2025, mayo). *Robo de vehículos asegurados: Conferencia de prensa* [PDF]. Centro Estadístico AMIS. https://centroestadisticoamis.mx/wp-content/uploads/2025/05/automoviles/robos/2024_04_Robo_de_Vehiculos_Asegurados_Conferencia_de_Prensa.pdf (centroestadisticoamis.mx)

Arízaga-Silva, J. A., Santiago, A. M., Espinosa-Tlaxcaltecatl, M., & Muñiz-Montero, C. (2025). Machine Learning-Powered IDS for Gray Hole Attack Detection in VANETs. World Electric Vehicle Journal, 16(9), 526–526. https://doi.org/10.3390/wevj16090526

B. Mounika, K. R. S. S. S. Durga. R., Ch. Veerendra, Ch. Veerendra., D. Siva Reddy, D. Siva. R., & Dr. B. Jagadeesh Babu, Dr. B. Jagadeesh. B. (2025). Intelligent Vehicle Theft Detection and Prevention. International Journal of Engineering and Science Invention, 14(4), 87–94. https://doi.org/10.35629/6734-14048794

Bluetooth SIG. (s. f.). *Bluetooth Core Specification Version 5.3: Feature Enhancements*. Recuperado de https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-core-specification-version-5-3-feature-enhancements/

Chen, K., & Tan, G. (2015). Modeling and Improving the Energy Performance of GPS Receivers for Mobile Applications. ArXiv (Cornell University). https://doi.org/10.48550/arxiv.1503.02656

Das, D. et al. (2021, Feb.). Decentralized Vehicle Anti-Theft System Using Blockchain and Smart Contracts. Peer-To-Peer Networking and Applications, 14, 2775–2788. https://doi.org/10.1007/s1 2083-021-01097-3

Dibaei, M., Zheng, X., Jiang, K., Abbas, R., Liu, S., Zhang, Y., Xiang, Y., & Yu, S. (2020). Attacks and defences on intelligent connected vehicles: a survey. Digital Communications and Networks, 6(4), 399–421. https://doi.org/10.1016/j.dcan.2020.04.007

Gayathri, M., & Gomathy, C. (2022). AI-TASFIS: An Approach to Secure Vehicle-to-Vehicle Communication. Applied Artificial Intelligence, 36(1). https://doi.org/10.1080/08839514.2022.2145636

Hercog, D., Lerher, T., Truntič, M., & Težak, O. (2023). Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices. Sensors, 23(15), 6739. https://doi.org/10.3390/s23156739

u-blox AG. (2010). *NEO-6: u-blox 6 GPS Modules - Data Sheet* (GPS.G6-HW-09005-B1) [PDF]. Datasheethub. https://www.datasheethub.com/wp-content/uploads/2022/08/NEO6MV2-GPS-Module-Datasheet.pdf (datasheethub.com)

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Oscilador Clapp implementando memristores Knowm

Tomás A. Jiménez-Castillo * **Luis M. López-Jiménez** **
Alejandro Díaz-Sánchez ***

* *Instituto Tecnológico Superior de Pánuco, CO 93998 México (e-mail: tomas.castillo@itspanuco.edu.mx).*
** *Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, Oaxaca, CO 68120 México (e-mail: lslopez.alu@uabjo.mx)*
*** *Departamento de Electrónica, INAOE, Puebla, CO 72840 México (e-mail: adiazsan@inaoep.mx)*

Abstract: The present investigation uses the LTSpice software to model the behavior of different circuits to further experiment with a Knowm memristor implemented in a Clapp-type LC oscillator circuit. The objective was to analyze possible variations in the amplitudes of peak-to-peak voltages, the percentage of positive and negative cycles, and the frequency of resonance due to memristor hysteresis. For this purpose, tools such as the Analog Discovery Studio laboratory of the Digilent brand were used to observe changes in the dynamic behavior of the oscillator and explore new applications in both analog and digital electronics, since these devices are booming and are accessible to the public thanks to manufacturers such as Knowm.

Keywords: LTspice, Knowm, Memristor, Clapp.

1. INTRODUCTION

Alrededor del siglo pasado a principios de la década de los 70, el científico Leon Chua, Descubrió teóricamente un cuarto elemento fundamental de la electrónica nombrado memristor, el cual diseño con componentes disponibles para emular su comportamiento y presentarlo en su artículo publicado en 1971 (Chua (1971)). Describiendo al memristor como una resistencia con memoria capaz de recordar su estado anterior incluso cuando no se le está aplicando un voltaje al dispositivo (Nugent (2020)), así como también el valor resistivo puede cambiar acorde en la dirección en la que fluya la corriente a través del memristor. Actualmente en el mercado existe a la venta por parte de la empresa Knowm los cuales tiene un catálogo de diferentes tipos de memristores, también se tiene en su sitio web la hoja de datos de sus productos, así como modelos para el software de LTSpice y simulaciones con diferentes ejemplos tanto el memristor ideal como el propio del fabricante (Knowm (2019a)), dichos modelos de LTSpice se usaron para hacer comparaciones. Teniendo como resultado las diferentes respuestas de una oscilación generada con un circuito oscilador LC tipo Clapp con componentes discretos (Floyd (2008)).

Este trabajo presenta (i) una metodología de diseño para un oscilador Clapp con integración de un memristor comercial Knowm (tipo W, SDC), incluyendo especificaciones, síntesis de componentes y dimensionamiento de ganancia bajo el criterio de Barkhausen; (ii) una validación cruzada mediante simulación LTspice con barrido de tolerancias y experimentación de banco.

2. MEMRISTOR DE KNOWM

La información del memristor proviene directamente de la hoja de datos de la empresa Knowm su fabricante. El memristor desarrollado por Knowm, correspondiente al Canal Autodirigido Knowm (SDC), está compuesto por una pila de materiales que permite la conducción de iones metálicos. Este tipo de dispositivo se conoce como celda de metalización de electroquímica (ECM), que se basa en el movimiento de Ag+ hacia los canales internos de su capa activa para modificar la resistencia del dispositivo.(Knowm (2019b))

El fabricante Knowm indica que los dispositivos SDC están inicialmente en un estado de alta resistencia, con valores que oscilan entre megaohms (MΩ) y gigaohms (GΩ) después de su fabricación. Cuando el memristor es usado por primera vez se forma un canal autodirigido en el dispositivo durante la aplicación de un voltaje positivo al electrodo superior (Jiménez and S. (2024),Hsieh et al. (2019)). El voltaje requerido para esta operación es el mismo que se necesita durante el funcionamiento normal del dispositivo (Yu et al. (2014),Barraj and M. (2024)). Los memristores utilizados son de tipo W, que se refiere al dopante introducido en la capa activa durante la fabricación; en este caso, se trata de tungsteno. Esta configuración modifica las características de conmutación del dispositivo, esta configuración una de los 4 tipos que ofrece Knowm (Nugent (2020)). Para la simbología empleada en los memristor de Knowm, véase Fig. 1

Fig. 1. Knowm memristor symbol Knowm (2019b)

2.1 Resultados obtenidos en simulación LTSpice

Con base en el modelo disponible en el sitio oficial del fabricante (Knowm (2019a)), se realizó la simulación en LTSpice, como se observa en la Fig. 2, para analizar el comportamiento dinámico del memristor obteniendo los resultados de Fig. 3.

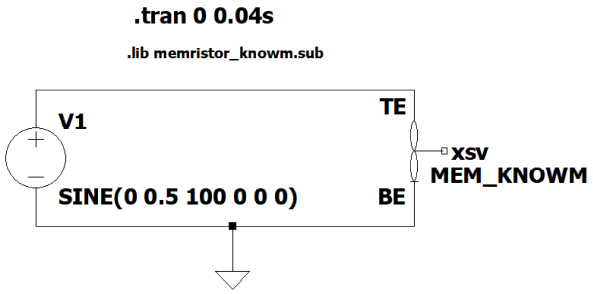


Fig. 2. Circuito de prueba para el memristor de Knowm. Fuente: Knowm (2019a)

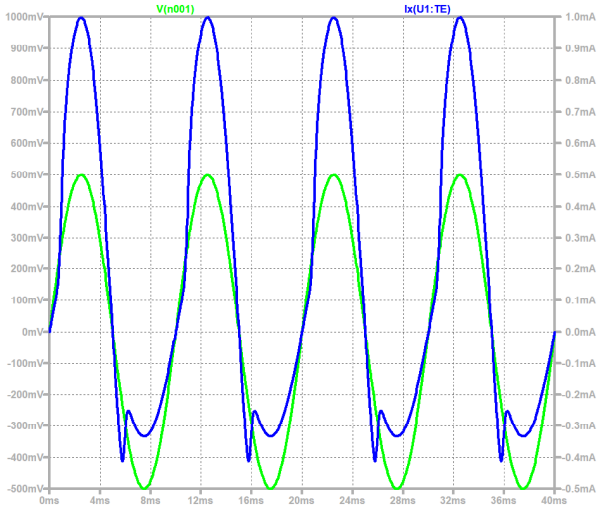


Fig. 3. Voltaje y corriente en el circuito del memristor.

Como se puede apreciar en la Fig. 3, el grafico en color verde es el voltaje de alimentación del circuito de la Fig. 2 con una amplitud de 500mV y una frecuencia de 100 Hz, mientras que en la Fig. 4 se puede apreciar la corriente en el eje Y, y el voltaje sobre el eje X, haciendo así una gráfica XY del funcionamiento del memristor, que es parecido a las alas de una mariposa.

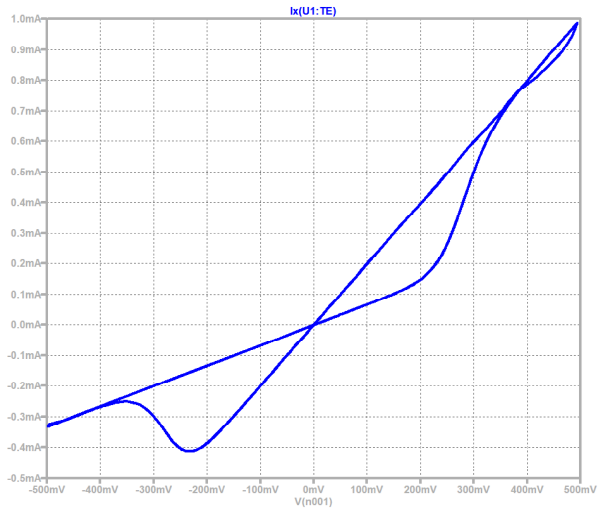


Fig. 4. Grafica XY, corriente en función del voltaje.

2.2 Resultados experimentales del memristor Knowm

Los resultados experimentales del memristor Knowm se obtuvieron en el laboratorio de circuitos utilizando el dispositivo Analog Discovery Studio de la marca Digilent. Este equipo se conecta vía USB al ordenador y opera mediante el software WaveForms, desarrollado por el mismo fabricante. Fig. 5 muestra las características del dispositivo empleado durante el proceso de experimentación.

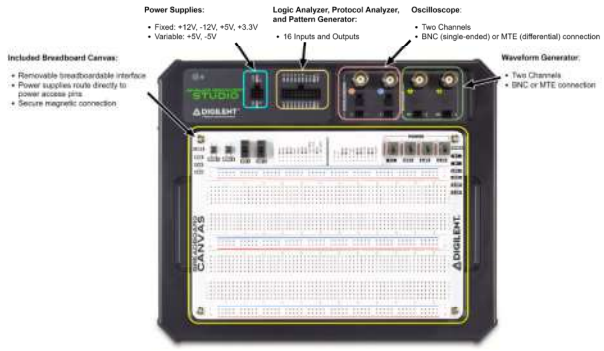


Fig. 5. Analog Discovery Studio marca Digilent, Fuente: Elektroráj (2025)

Se realizó la experimentación con este tipo de memristor 8x8 W+SDC proporcionado por el fabricante. Posteriormente, el dispositivo fue conectado en serie a un resistor de 51kΩ, conectando los dos canales del osciloscopio en las terminales del memristor como se muestra en Fig. 6, mientras se aplicaba un voltaje senoidal 1Vpp-100Hz entre ambos componentes en serie, tal como se observa en Fig. 7, el voltaje aplicado en color naranja y la caída de tensión entre el memristor y el resistor en color azul, del mismo modo se presenta un gráfico "XY", colocando en el eje "X", el voltaje aplicado, y en el eje "Y", el voltaje entre los dos componentes, véase Fig. 8.

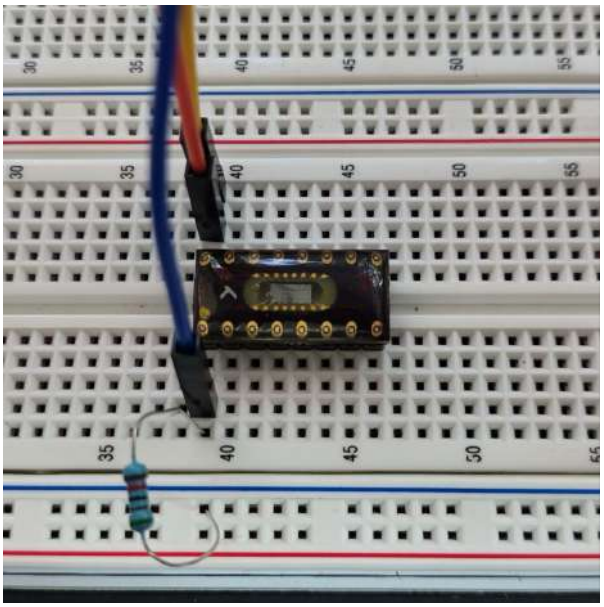


Fig. 6. Circuito ensamblado en físico.

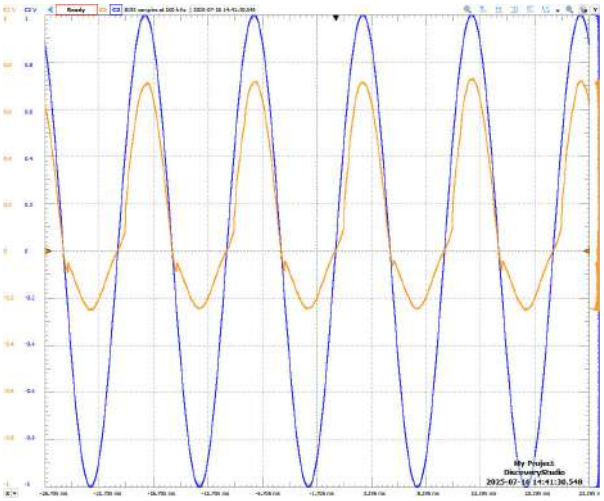


Fig. 7. Gráficas obtenidas en el software WaveForms

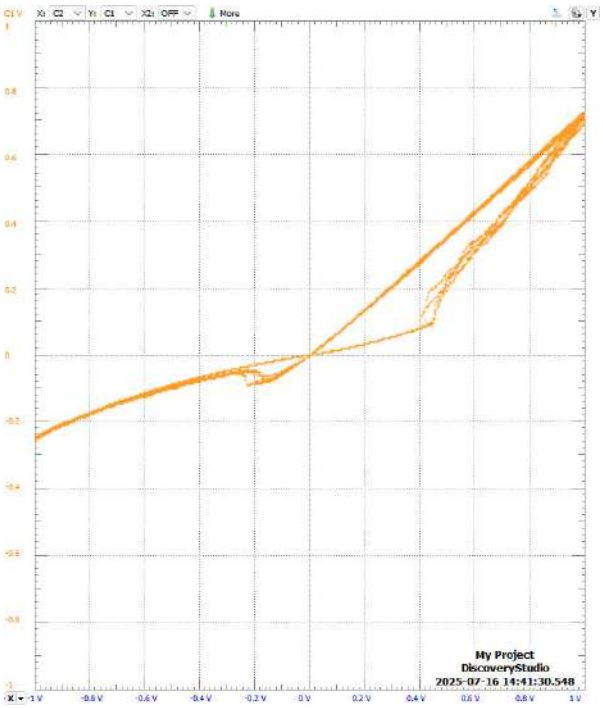


Fig. 8. Gráfico XY obtenido usando los dos canales del osciloscopio

3. OSCILADOR CLAPP.

El circuito propuesto es un oscilador Clapp (Floyd (2008)), implementado con componentes discretos para su experimentación en físico. Este oscilador independiente tipo Clapp es muy parecido al oscilador Colpitts, con la diferencia de que se agrega un capacitor en serie a la bobina de la red LC, como se puede observar en Fig. 9.

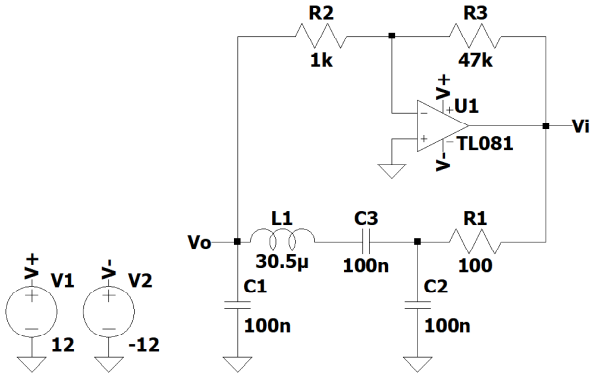


Fig. 9. Oscilador Clapp simulado en LTSpice

Para este oscilador Clapp, se optó por utilizar un op-amp TL081, por su facilidad de construcción y su alto ancho de banda, que es de aproximadamente 5.25MHz (Texas Instruments (2024)). El circuito se compone de dos partes principales que lo conforman: la de amplificación y la de retroalimentación, las cuales deben cumplir los criterios de Barkhausen (Razavi (2015)), los cuales son fundamentales para que un sistema de retroalimentación comience a oscilar.

El circuito representado en Fig. 9, fue simulado en LTSpice. Como resultado, se obtuvieron las siguientes señales que se muestran en Fig. 10. La señal de color verde corresponde al nodo V_i que es la salida del amplificador con ganancia de 47, la cual está saturada. En cambio, la señal azul que corresponde al nodo V_o, la cual es la salida de la red de retroalimentación Clapp, presenta una señal senoidal pura, aunque de menor amplitud debido a que esta no está amplificada.

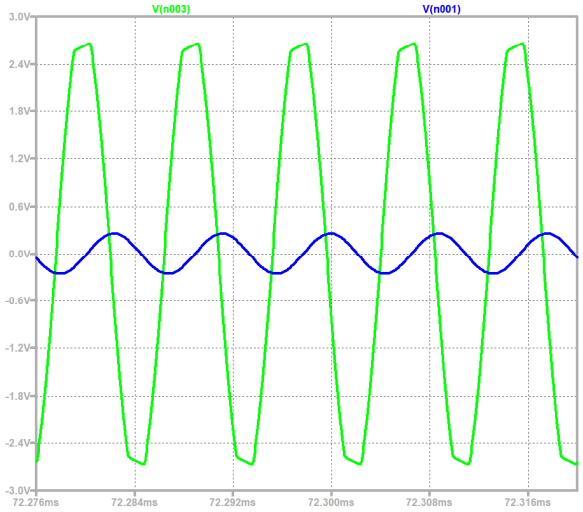


Fig. 10. Respuesta usando LTSpice del circuito Oscilador tipo Clapp.

Para el diseño del circuito, se analizó la red de retroalimentación LC Clapp para poder determinar su función de transferencia, su resonancia y su atenuación. Así como también los componentes que lo conforman, como se aprecia en Fig. 11.

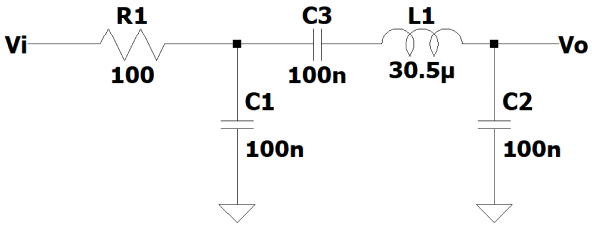


Fig. 11. Red de retroalimentación LC tipo Clapp.

La red de dos mallas está compuesta con los siguientes componentes:

- $R_1 = 100\Omega$
- $C_1 = C_2 = C_3 = 100nF$
- $L_1 = 30.5uH$
- $V_i =$ voltaje de entrada
- $V_o =$ voltaje de salida

La función de transferencia de la red Clapp de Fig. 11, es (1).

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{L_1C_1C_2R_1s^3 + L_1C_2s^2 + (Z)s + \frac{C_2}{C_3} + 1}. \quad (1)$$

Dónde

$$Z = \frac{R_1C_1C_2}{C_3} + R_1C_2 + R_1C_1 \quad (2)$$

En Fig. 12 y Fig. 13, se presentan las gráficas obtenidas mediante la simulación de la función de transferencia de la red LC tipo Clapp, utilizando el lenguaje de programación Python y su librería de control. Este análisis permite evaluar la dinámica del sistema frente a dos señales de entrada fundamentales, que son las funciones impulso y escalón.

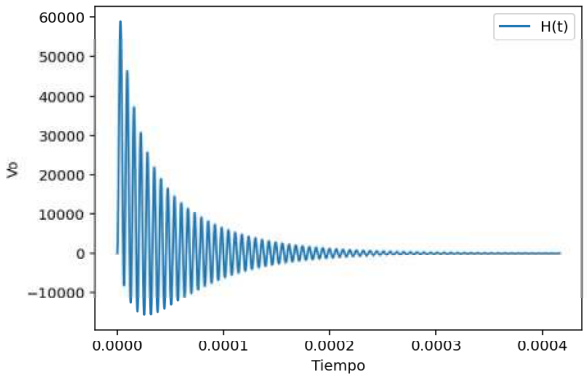


Fig. 12. Función de transferencia de la red Clapp ante una función impulso.

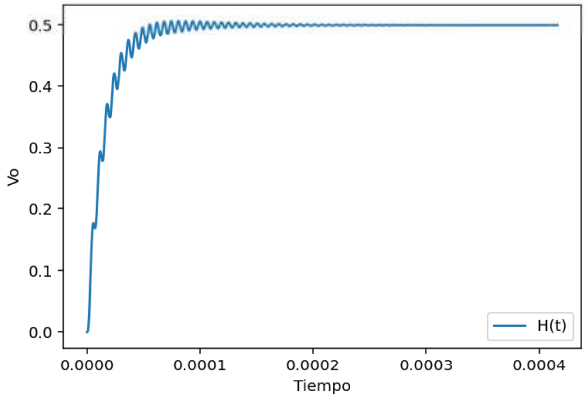


Fig. 13. Función de transferencia de la red Clapp ante una función escalón.

Posteriormente se hace el análisis de resonancia de la red Clapp, tomando la parte imaginaria de la función de transferencia, véase (3), donde el color rojo corresponde a la parte Real de la ecuacion y el azul a la imaginaria.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{j^2\left(\frac{1}{\omega C_1}\frac{1}{\omega C_2}\right)}{I + j^2\left(-\frac{1}{\omega C_1}\left(-\frac{1}{\omega C_3} + \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_2}\right)\right)} \quad (3)$$

Dónde

$$I = jR_1\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{1}{\omega C_2} - \frac{1}{\omega C_3}\right) \quad (4)$$

Si hacemos la parte imaginaria de la ecuación 2 es igual a cero, con el fin de despejar ω, despues se realiza el cambio $\omega = 2\pi f$ para obtener el valor de f, dando como resultado (5):

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_{eq}}} \tag{5}$$

Donde:

$$C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

Al sustituir nuestros valores fisicos de los componentes, obtenemos la siguiente frecuencia:

$$f = 157{,}852.8964 \text{ Hz} \approx 157 \text{ kHz}$$

la cual es la frecuencia de resonancia de la red tipo Clapp. Para obtener la atenuación de la misma red Clapp, toma la parte real de la función de transferencia, utlizando los valores de reactancia para los componentes inductivos y capacitivos de la siguiente forma:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad \text{y} \quad X_L = 2\pi f L \tag{6}$$

Obteniendo la siguiente función de transferencia

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{10.1372\Omega}{(10.1372\Omega + 30.0870\Omega) + 10.1372\Omega} = 0.2012 \tag{7}$$

Siguiendo el criterio de Barkhausen, se obtiene el valor de B

$$B = 0.2012$$

En consecuencia, la ganancia del amplificador ideal debe ser como mínimo $A_v \geq 5$, a fin de que se satisfaga el criterio de Barkhausen (Razavi (2015)).

$$A_{cl} = A_v \cdot B = 1 \tag{8}$$

3.1 Resultados experimentales del oscilador Clapp

Siguiendo la metodología aplicada en el estudio del memristor, se realizaron pruebas experimentales del oscilador Clapp utilizando el laboratorio de circuitos Analog Discovery Studio (véase figura 15). Los resultados coinciden en gran medida con los obtenidos en la simulación realizada en LTSpice. No obstante, se identificó una diferencia importante: la señal en el nodo V_i, correspondiente a la salida del amplificador, no presentó saturación. Por el contrario, mostró una onda senoidal clara, similar a la señal V_o, como se aprecia en la figura 18.

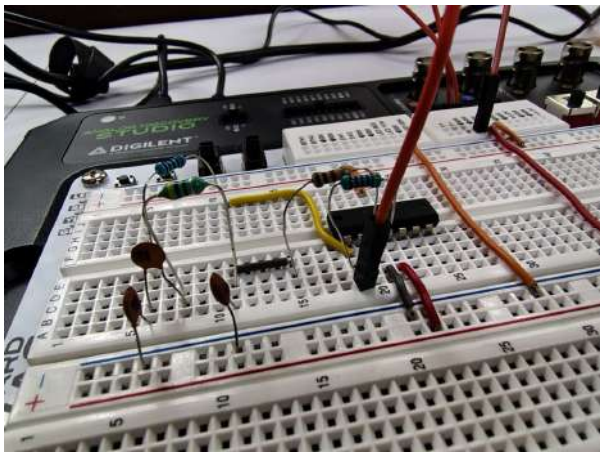


Fig. 14. Oscilador Clapp con componentes discretos.

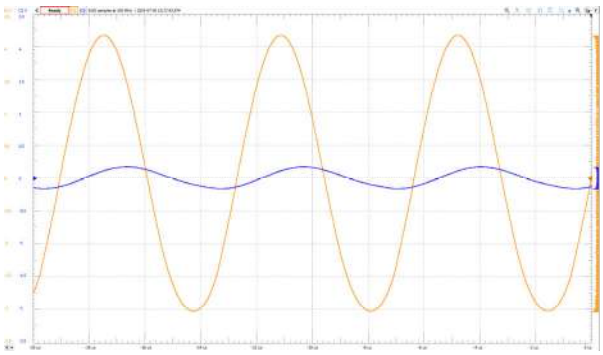


Fig. 15. Respuesta del oscilador Clapp.

Table 1. Mediciones realizadas en el canal 1, salida V_i del oscilador Clapp

Parámetro	**Valor**
Maximum	2.2133 V
Minimum	-2.05928 V
Peak2Peak	4.27252 V
Middle	78.828 mV
AC RMS	1.5154 V
Overshoot	1.6637 %
Frequency	158.14 kHz
Period	6.3237 μs
PosDuty	48.335 %
NegDuty	51.665 %

La Tabla 1, muestra los valores obtenidos en el software de WaveForms, como una frecuencia de oscilación del Oscilador Clapp de 158.14kHz. También se muestran los voltajes máximos y mínimos, la amplitud pico a pico, así como el ancho de los ciclos positivos y negativos, los cuales corresponden aproximadamente al 50 % del período cada uno.

3.2 Conectando una carga al Oscilador Clapp

Se conectó el circuito de prueba del memristor Knowm, junto con una resistencia en serie de 51KΩ a la salida del oscilador Clapp, cuya salida es el nodo V_i, como se muestra en Fig. 9. La configuración final se aprecia en Fig. 16.

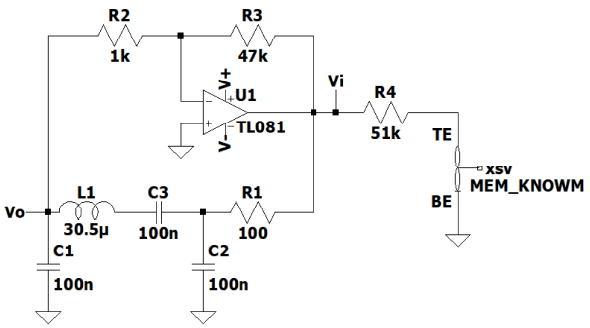


Fig. 16. Oscilador Clapp con carga resistiva + memristor.

En la Fig. 17 se observa la salida del oscilador (señal azul) y el voltaje en el memristor (señal naranja). Esta última presenta una forma que tiene a desplazarse hacia la izquierda, asemejándose ligeramente a una señal triangular.

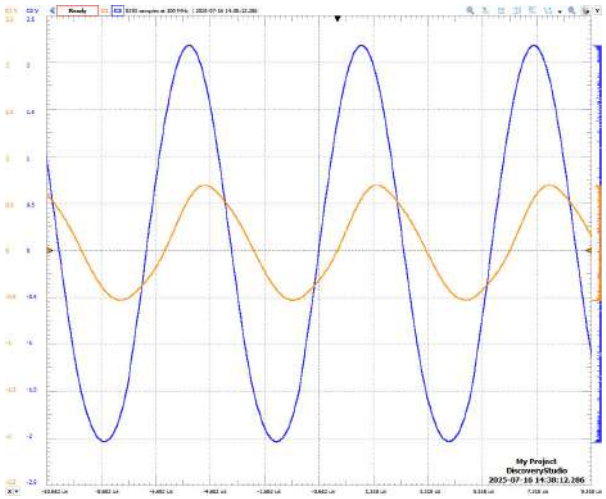


Fig. 17. Salida del oscilador y salida del voltaje en el memristor.

4. DISTINTAS CONFIGURACIONES AL OSCILADOR CLAPP

Las configuraciones realizadas consistieron en sustituir los resistores del circuito del oscilador Clapp por el memristor Knowm, específicamente en las posiciones de R_1 y R_2, con el fin de analizar su comportamiento. Cuando se reemplazó el resistor R_1 por el memristor, se observó una afectación directa en la red de retroalimentación. En cambio, al sustituir el resistor R_2, que junto con R_3 determina la ganancia del amplificador, el efecto fue distinto. El resistor R_3 no fue reemplazo por el memristor, ya que determina la ganancia del amplificador inversor y es fundamental para que el oscilador Clapp inicie la oscilación.

4.1 Caso 1

Fig. 18, presenta la señal azul del canal 2 corresponde a la salida del nodo V_o del circuito, mientras que la señal naranja es la salida en el nodo V_i. Se puede observar la distorsión en las oscilaciones, atribuida al efecto del memristor.

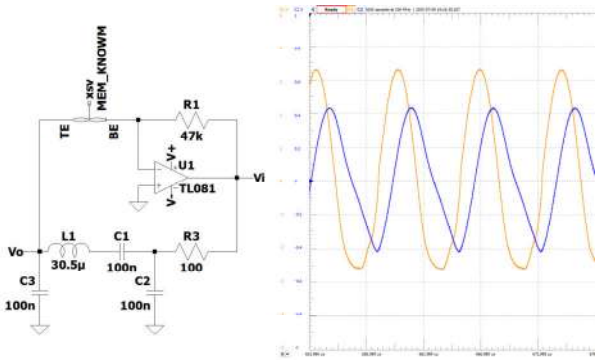


Fig. 18. Caso 1 de la configuración y señales resultantes en Vo y Vi.

4.2 Caso 2

La señal azul corresponde a la salida en el nodo V_o, en la cual se aprecia una distorsión en la oscilación. Aunque el memristor no forma parte directa de la red de tanque LC del oscilador Clapp, influye en la señal de salida generada por la red LC. Por otro lado, la señal naranja representa la salida en el nodo V_i, que corresponde a la señal amplificada. En esta se observa una ligera variación en la forma de la oscilación. Véase Fig. 19.

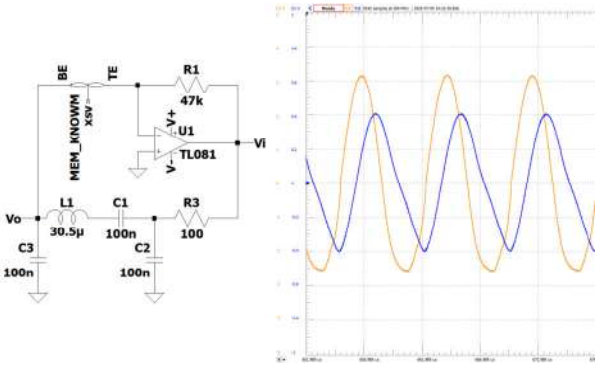


Fig. 19. Caso 2 de la configuración y señales resultantes en Vo y Vi.

4.3 Caso 3

La señal azul corresponde a la salida del nodo V_o. A diferencia de las ilustraciones anteriores, en este caso se redujo la escala vertical para amplificar visualmente la señal y facilitar la observación de su forma, la cual tiende a asemejarse a una onda triangular. Por su parte la señal naranja, correspondiente a la salida en el nodo V_i, presenta una forma similar a una onda senoidal, aunque con una distorsión evidente en el ciclo negativo. Véase la Fig. 20.

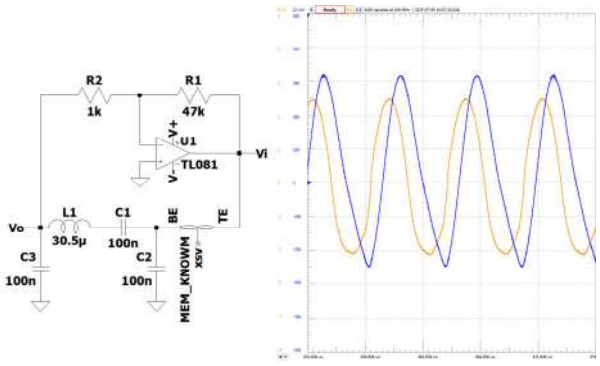


Fig. 20. Caso 3 de la configuración y señales resultantes en Vo y Vi.

4.4 Caso 4

Fig. 21, muestra una disminución notable en la amplitud de la oscilación. Esto debido a que el memristor está conectado en serie con la resistencia R_3, que corresponde al resistor R_1 de 100 ohmios en el análisis de la red Clapp. Dicha configuración aumenta el valor resistivo total, afectando directamente el funcionamiento del oscilador, ya que se requeriría una mayor ganancia para compensar dicha perdida. Sin embargo, no se implementó un aumento en la amplificación, ya que la señal resultante se volvía excesivamente saturada, asemejándose a una señal cuadrada tipo reloj.

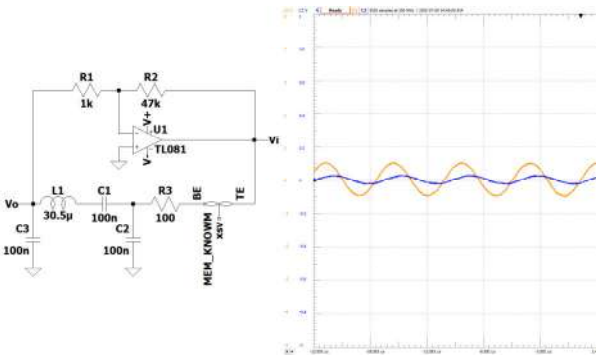


Fig. 21. Caso 4 de la configuración y señales resultantes en Vo y Vi.

4.5 Caso 5

En Fig. 22, se observa que se invirtió la polaridad del memristor en comparación con el caso 4, lo que provoca una disminución drástica en la amplitud de señal del circuito. Transcurridos algunos segundos bajo esta condición, lleva a que el oscilador deje de funcionar por completo. Este comportamiento se debe a que la resistencia del memristor varía según el sentido en el que se conecta, afectando así la dinámica del circuito.

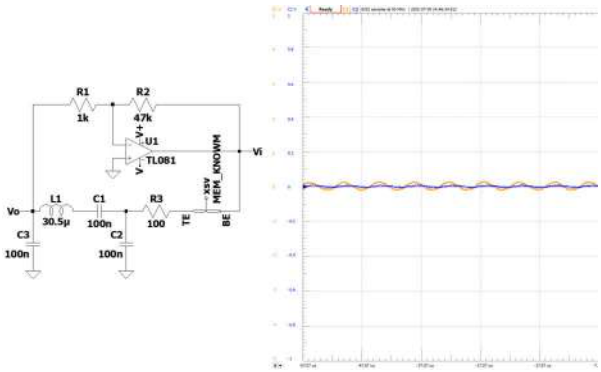


Fig. 22. Caso 5 de la configuración y señales resultantes en Vo y Vi.

5. RESULTADOS

Las diferentes configuraciones al oscilador Clapp, al implementar el memristor de Knowm en distintas posiciones resistivas, se observó la presencia del ciclo de histéresis característico del dispositivo. Este efecto se manifestó principalmente en la deformación de las oscilaciones medidas en el nodo V_i, el cual fue tomado como referencia debido a que se representa la salida amplificada del OPAM TL081. En esta señal se registró una amplitud pico a pico de aproximadamente 4.2 V, en contraste con la señal del nodo V_o (salida directa de la red Clapp), cuya amplitud fue considerablemente menor. Sin embargo, se evidencio que la señal más afectada por las distintas configuraciones del memristor fue la del nodo V_o, especialmente en los casos 1, 2 y 3, donde se observaron mayores deformaciones. Aunque ambas señales (V_i y V_o) mostraron la misma frecuencia de oscilación al ser medidas con el software WaveForms, la amplitud varió significativamente. Por esta razón, se optó por utilizar la señal amplificada del nodo V_i como referencia principal en los resultados.

Table 2. Comparación de configuraciones: Voltajes

Configuración	V Max	V Min	Vpp
Oscilador Clapp	2,2133 V	-2,0592 V	4,2725 V
Memristor como carga	633,85 mV	-276,98 mV	1,1101 V
Caso 1	3,2022 V	-2,5892 V	5,7921 V
Caso 2	3,1627 V	-2,6002 V	5,7630 V
Caso 3	1,8350 V	-1,2386 V	3,0692 V
Caso 4	461,55 mV	-129,01 mV	0,8905 V
Caso 5	49,88 mV	-47,56 mV	97,45 mV

Table 3. Comparación de configuraciones: Frecuencia y ciclos

Configuración	Frecuencia	Ciclo +	Ciclo -
Oscilador Clapp	158,14 kHz	48,33 %	51,66 %
Memristor como carga	158,46 kHz	47,05 %	52,94 %
Caso 1	137,41 kHz	45,66 %	54,33 %
Caso 2	135,89 kHz	45,94 %	54,05 %
Caso 3	155,37 kHz	41,05 %	58,94 %
Caso 4	166,49 kHz	49,32 %	50,67 %
Caso 5	166,66 kHz	49,11 %	50,88 %

Al analizar las tablas 2 y 3, que muestran distintas mediciones realizadas con el software WaveForms, se observa cómo las configuraciones del memristor en el oscilador

Clapp afectan tanto a la frecuencia como a la amplitud de la señal. En los casos 1 y 2, la frecuencia de oscilación disminuye respecto al circuito base, mientras que el voltaje pico a pico se incrementa. En contraste, en los casos 4 y 5, donde el memristor se conectó en serie con el resistor R_1 de la red Clapp, la frecuencia aumentó hasta aproximadamente 166 kHz. Sin embargo, en estas configuraciones, la amplitud de la señal disminuyó considerablemente. Curiosamente, fueron también los casos donde los ciclos positivos y negativos de la señal presentaron una distribución cercana al 50 % cada uno. En el caso 3, la frecuencia fue muy similar a la del oscilador Clapp sin memristor, aunque se registró una reducción en la amplitud pico a pico. Además, los ciclos positivos y negativos fueron totalmente desiguales.

6. CONCLUSIONES

Se integraron memristores Knowm (W, SDC) en un oscilador Clapp y se evaluó su efecto sobre amplitud, simetría de ciclo y frecuencia. Las configuraciones ensayadas muestran que la frecuencia central alrededor de 158kHz puede desplazarse típicamente entre 136kHz y 167kHz, en concordancia con tolerancias de L y C y con la carga memristiva dependiente de historia y polaridad. La amplitud y la forma de onda son las magnitudes más afectadas (incrementos/reducciones de V_{pp} y distorsión), mientras que los ciclos positivo/negativo se aproximan al 50 % en configuraciones con mayor resistencia efectiva de la red. Este estudio, tanto teórico como experimental, aporta evidencia relevante sobre el comportamiento de los dispositivos memristivos de Knowm en circuitos analógicos, con énfasis en aplicaciones como los osciladores LC.

REFERENCES

Barraj, I. and M., H.M.M. (2024). Overview of memristor-based design for analog applications. *Micromachines*, 15(505), 1–25. doi:10.3390/mi15050505.

Chua, L.O. (1971). Memristor - the missing circuit element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 18(5), 507–519. doi:10.1109/TCT.1971.1083337.

Elektroráj (2025). Digilent analog discovery studio. URL `https://www.elektroraj.cz/2019/06/26/digilenta´nalog-discovery-studio/`.

Floyd, T.L. (2008). Osciladores. In *Dispositivos Electrónicos*, 799–844. Pearson Educación, Naucalpan de Juárez, Estado de México, México.

Hsieh, P.H., T., M.L., H., S.Y., L., M.H., and C., Y.H. (2019). Design and implementation of a memristor-based oscillator. In *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 1–4. doi: 10.1109/ISCAS.2019.8702007.

Instruments, T. (2024). *TL08xx FET - Input Operational Amplifiers*. Datasheet.

Jiménez, L.M.L. and S., A.N.L.V.A.D. (2024). Simulación y construcción de un circuito emulador de un memristor. *Pistas Educativas*, 46(148), 474–488.

Knowm (2019a). Github - memristor-models-4all. URL `https://github.com/knowm/memristor-models-4all/tree/master.´`

Knowm (2019b). *Knowm SDC Memristors, Self Directed Channel Memristors*. URL `https://www.knowm.com`.

Nugent, A. (2020). *Knowm Memristor Discovery Manual*. Knowm. URL `https://knowm.org`.

Razavi, B. (2015). Oscillators. In *Microelectronics*, 588–618. Wiley, Printed in Asia.

Yu, D., H.-C., H., F., A.L., and L., Y. (2014). A floating memristor emulator based relaxation oscillator. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 61(10), 2888–2896. doi:10.1109/TCSI.2014.2332632.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Frugal Prototype of an Autonomous Robot with Sensory Fusion and Bluetooth Communication

Álvarez-González, Ricardo[*,]. González-Contreras Brian Manuel.[**]**

**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla-Facultad de Ciencias de la Electrónica, Av. San Claudio y 18 sur Col. San Manuel. C.P. 72570. Puebla, Puebla, México, (e-mail: ricardo.alvarez@correo.buap.mx, 20234643@uatx.mx).*

***Facultad de Ciencias Básicas de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Carretera Apizaquito S/N, San Luis Apizaquito, C.P. 90401, Apizaco, Tlaxcala, México. (e-mail: brianmanuel.gonzalez@uatx.mx)*

Abstract: An autonomous wheeled mobile robot is presented, built with off-the-shelf components, that fuses data from its optical encoders and an IMU to estimate its relative location. The user interface is a smartphone that via Bluetooth, selects its operation mode and transmits its (x,y,Θ) coordinates, allowing its estimated trajectory to be plotted in post-processing using a Python script. Experiments were conducted in a confined space of 3.4 x 2.4 m where the robot navigated freely, achieving an accuracy of 87.35% and an RMS error of 0.18 m in the estimated trajectories. As a low-cost prototype, it may inspire those interested in exploring the field of mobile robotics.

Keywords: Autonomous Mobile Robot, IMU, Data Fusion, ESP-32, Python, Estimated Trajectory.

1. INTRODUCCIÓN

Recientemente el desarrollo de robots móviles autónomos (RMA) ha cobrado gran relevancia. De acuerdo con Loganathan et al. (2023), los RMA han contribuido a incrementar la productividad en una gran variedad de dominios tales como manufactura, agricultura, milicia y educación. Entre las diversas categorías de robots móviles, los que funcionan con ruedas (RMAR) son los más ampliamente usados para ejecución de tareas. Por lo que, el control de movimiento para los RMAR es un tópico importante de investigación que ha sufrido un progreso muy importante en los últimos años (Mahmud et al. 2023).

Conocer la ubicación de un RMAR es uno de los principales retos de la robótica móvil (Siciliano et al. 2016) y existen diversas maneras de acometer esta tarea, para lo cual frecuentemente se utilizan sensores muy sofisticados, así como herramientas de software que requieren el pago de onerosas licencias para utilizarlo. En este trabajo se presenta el prototipo de un RMAR construido con componentes comerciales económicos de fácil adquisición, que fusiona los datos de sus codificadores infrarrojos de sus ruedas con los proporcionados por una unidad de medición inercial (IMU) para obtener las coordenadas (x,y,Θ) que transmite mediante bluetooth a un teléfono inteligente con sistema operativo Android vinculado al RMAR, para posteriormente graficar su trayectoria estimada mediante un script en Python.

1.1Trabajos relacionados

La motivación de abordar el problema de localización de un RMAR que funcione sin componentes sofisticados se ha reportado en diversos trabajos, como el de Yoon et al. (2025), en donde realizan la localización de un robot a partir de los codificadores de sus ruedas, identificando el tipo de superficie en donde se desplaza, pero ellos realizan experimentos con un robot comercial: el Turtlebot3.

El uso de una IMU para robots autónomos es muy recurrente, en el trabajo de Tran-Ngoc et al. (2025), reportaron un algoritmo de localización basado en una IMU que estima la orientación y posición a partir de la marcha de un sistema híbrido insecto-máquina, que realizaron colocándole el sistema electrónico integrado básicamente por una IMU, una cámara infrarroja, un chip de comunicación y un microcontrolador a una cucaracha de Madagascar, para estimar su trayectoria recorrida.

La fusión de sensores para optimizar el funcionamiento de robots móviles también es un tema recurrente de investigación, como mencionan en Chica et al. (2009), donde utilizan un algoritmo de fusión basado en lógica difusa de los sensores infrarrojos del robot comercial Khepera II y una cámara CMUCam2 para crear un sistema de navegación del robot. Otro ejemplo de fusión de datos de sensores se reporta en el trabajo de Teng et al. (2024), en donde realizan la fusión de los datos de la navegación estimada mediante odometria, una IMU y un sensor de detección y medición por luz láser (LiDAR) para el posicionamiento de un RMAR de cuatro ruedas en un

ambiente interior, usan un microcontrolador STM32 para la activación de los cuatro motores y la conexión de la IMU, y una RaspBerry Pi4B para gestionar la comunicación con el sensor LiDAR así como con una PC.

La comunicación inalámbrica entre un teléfono inteligente y un robot móvil también es de gran interés didáctico, como se muestra en el trabajo de Zamudio et al. (2023), en donde describen detalladamente la construcción de un robot móvil diferencial de dos ruedas orientado a la educación STEM, basado en un microcontrolador Arduino Uno, complementado con un módulo Bluetooth, sus componentes son similares a los usados en este trabajo, pero la diferencia principal es que no se trata de un vehículo autónomo ya que es guiado remotamente por el usuario mediante una aplicación ejecutada desde un teléfono inteligente.

Como se puede apreciar en los trabajos relacionados mencionados, la localización estimada de un RMAR es un tema de investigación muy importante, en donde típicamente se usan robots comerciales y fusión de sensores, en algunos casos muy sofisticados para realizar los experimentos. El trabajo que a continuación se reporta está enfocado al mismo tema, pero sin usar un robot comercial armado de fábrica, ni software que requiere licencia para su funcionamiento, es decir, un prototipo frugal.

1.2 Localización relativa de un RMAR

La localización relativa se realiza por navegación estimada, es decir por el movimiento del RMAR entre dos ubicaciones. Esto se realiza repetidamente mientras el robot se mueve y las mediciones del movimiento son acumuladas para obtener una estimación de la distancia recorrida desde el punto inicial. Debido a que las estimaciones individuales de las posiciones no son exactas, los errores se acumulan y el error absoluto en la estimación del movimiento total se incrementa con la distancia recorrida. Para un RMAR el método de navegación estimada se denomina odometría y está basado en los datos obtenidos de los codificadores incrementales de sus ruedas. Para un RAMR de tracción diferencial, son suficientes dos codificadores ópticos para estimar su localización, con los errores inherentes al posible deslizamiento de las ruedas en el piso (Tzafestas, 2014). El estado del RMAR, es decir, su posición (x,y) y orientación Θ, en el instante k se determina usando (1). Sean $\Delta l_1(k)$ y $\Delta l_2(k)$ los incrementos de las ruedas izquierda y derecha proporcionados por los codificadores en el instante k, si 2a es la distancia entre las dos ruedas se obtiene la estimación del desplazamiento mediante (2), y usando (3) se obtiene el incremento de orientación $\Delta\,\Theta$.

$$X(k)=[x(k),y(k),\Theta(k)]^T \quad (1)$$

$$\Delta l(k) = \frac{\Delta l_1(k) + \Delta l_2(k)}{2} \quad (2)$$

$$\Delta\theta(k) = \frac{\Delta l_2(k) - \Delta l_1(k)}{2a} \quad (3)$$

Si suponemos que $\Delta\,\Theta\,(k)$ es muy pequeño, se pueden hacer las aproximaciones expresadas en (4), (5), y (6) (Tzafesta

$$x(k+1)=x(k)+\Delta l(k)\cos(\Theta\,(k)+\Delta\,\Theta\,(k)/2) \quad (4)$$

$$y(k+1)=y(k)+\Delta l(k)\,sen(\Theta\,(k)+\Delta\,\Theta\,(k)/2) \quad (5)$$

$$\Theta\,(k+1)=\Theta\,(k)+\Delta\,\Theta\,(k) \quad (6)$$

Los sensores de orientación como los giroscopios proporcionan una medición de la posición considerando ejes en el espacio y se pueden combinar con los codificadores incrementales para mejorar la navegación estimada, ya que un giroscopio mide una orientación relativa al estado inicial, proporcionando una posición absoluta del robot (Yasuda et al., 2023).

1.3 Sensores de distancia del RMAR

Un robot móvil debe de ser capaz de encontrar objetos en su ambiente y en su trayectoria, para navegar con eficiencia y seguridad. El enfoque más común para encontrar obstáculos es mediante sensores activos que midan la distancia entre el robot y los objetos dentro de su campo de visión, emitiendo energía y midiendo el cambio o reflexión causada por el obstáculo (Yasuda et al., 2023). En el caso del RMAR presentado en este trabajo se mide la distancia por tres sensores ultrasónicos HC-SR04, ubicados al frente, a la izquierda y a la derecha del desplazamiento del robot.

1.4 Fusión de datos

Una unidad de medición inercial (IMU) es un dispositivo que utiliza sistemas de medición como giroscopios y acelerómetros para estimar la posición relativa, velocidad y aceleración de un vehículo en movimiento. (Siciliano et al., 2016). La IMU que se utiliza en este trabajo tiene un giroscopio y un acelerómetro de tres ejes cada uno, que se comunica mediante el bus I2C con la computadora de abordo para fusionar sus datos con los generados por la odometría, para ayudar a compensar errores en la estimación de la dirección del robot ya mencionados de acuerdo con (7):

$$\Delta\theta = (1 - BLEND_{YAW}) * \Delta\theta_{enc} + BLEND_{YAW} * \Delta\theta_{gyro} \quad (7)$$

En donde $\Delta\theta$ es el incremento en el ángulo de la orientación del RMAR que resulta de la fusión del incremento del ángulo de la orientación proporcionado por los codificadores $\Delta\theta_{enc}$ y el incremento del ángulo proporcionado por el giroscopio en el eje z de la IMU $\Delta\theta_{gyro}$ con el factor de ponderación $BLEND_{YAW}$ que debe de tener un valor entre 0.5 y 0.8, ya que considerando los casos extremos, si $BLEND_{YAW}=1$ solo se consideraría la información proporcionada por el giroscopio y si $BLEND_{YAW}=0$ solo se estaría considerando los datos proporcionados por la odometría obtenida a partir de los codificadores mediante (3), y si $BLEND_{YAW}=0.5$ la combinación sería simplemente el promedio de las dos mediciones.

2. METODOLOGÍA

2.1 Componentes comerciales que integran el prototipo

Como se observa en las figuras 1 y 2, el prototipo de RMAR se construyó con componentes comerciales, cuyo costo en pesos mexicanos se reporta en la tabla 1.

En la figura 1 se muestra el chasis del prototipo, observando los moto reductores de las ruedas junto con sus respectivos discos codificadores de 20 pulsos por revolución, que generan los pulsos necesarios para realizar la navegación estimada del robot, así como también se aprecia la rueda loca.

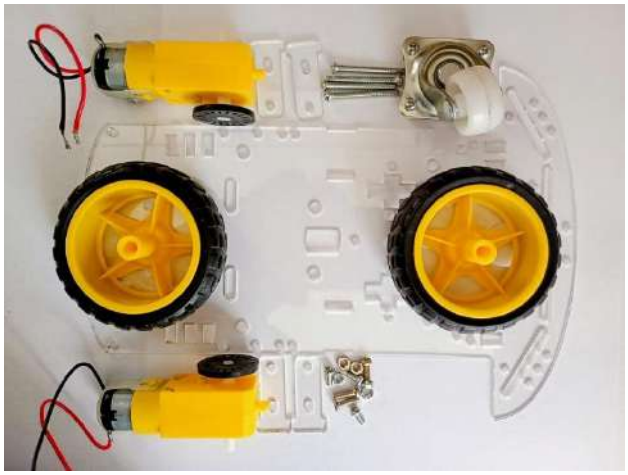


Figura 1. Chasis del prototipo de RMAR

En la figura 2 se muestran los soportes para los sensores ultrasónicos y los principales componentes electrónicos que integran el prototipo, en donde se observan: el Sistema en Chip (SoC) ESP32 que funciona como computadora de abordo, el puente H que se utiliza para invertir el sentido de giro de los moto reductores, los emisores-receptores infrarrojos, así como sus respectivos discos codificadores. Los tres sensores ultrasónicos son necesarios para que el robot detecte las paredes y obstáculos y pueda desplazarse de manera autónoma sin colisionar con ellos. También se observa la IMU MPU 6050, los datos de su giroscopio se fusionaran con los de los codificadores infrarrojos para obtener una estimación relativa mejorada del RMAR.

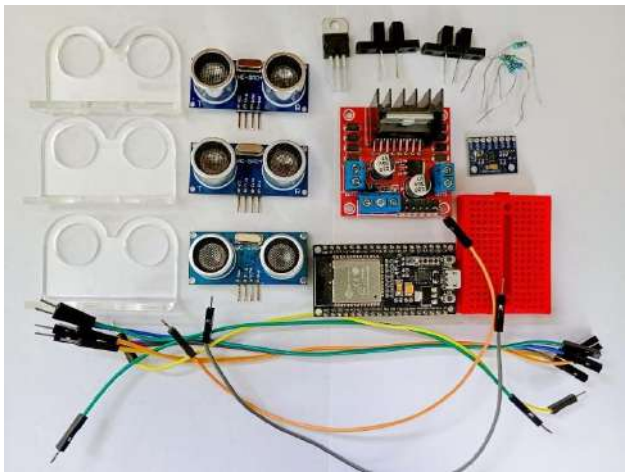


Figura 2. Componentes principales del prototipo de RMAR.

En la figura 3 se observa el prototipo armado y se puede apreciar la IMU ubicada sobre un bloque de madera montado sobre el chasis del robot.

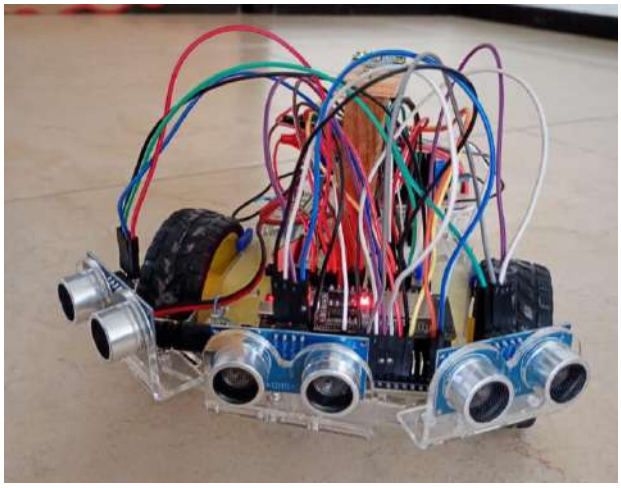


Figura 3. Robot móvil armado y energizado.

El robot se alimenta con dos batería Li-ion ICR 18650 de 3.7V y 2600 mAh conectadas en serie, para obtener un voltaje de 7.4 V, considerando que el consumo del RMAR es de 160 mA, tenemos una autonomía ideal de 16 horas.

Tabla 1. Costo del prototipo

Componente	Precio	Cantidad
Chasis de acrílico con 2 moto reductores, 2 ruedas, 2 discos codificadores de 20 PPR, rueda loca	$170.00	1
Soc ESP32 Wroom32	$190.00	1
Sensor ultrasónico HC-SR04	$35.00	3
Base para sensor HC-SR04	$18.00	3
Módulo puente H L298N, 2 canales	$50.00	1
IMU MPU 6050	$60.00	1
Regulador de voltaje LM7805	$10.00	1
Paquete de cables de conexión	$35.00	1
Batería recargable Li-ion ICR 18650	50.00	2
Porta baterías	37.00	1
Total	$811.00	

2.2 Funcionamiento del RMAR

Cuando se enciende el robot realiza la calibración de la IMU durante dos segundos e inicia su comunicación por Bluetooth,

presentando un menú y espera los comandos enviados por el usuario desde la interfaz serial de un teléfono inteligente vinculado al RMAR como se observa en la figura 4, en donde se envió el comando "cir" y el robot inició su movimiento en trayectoria circular enviando sus coordenadas.

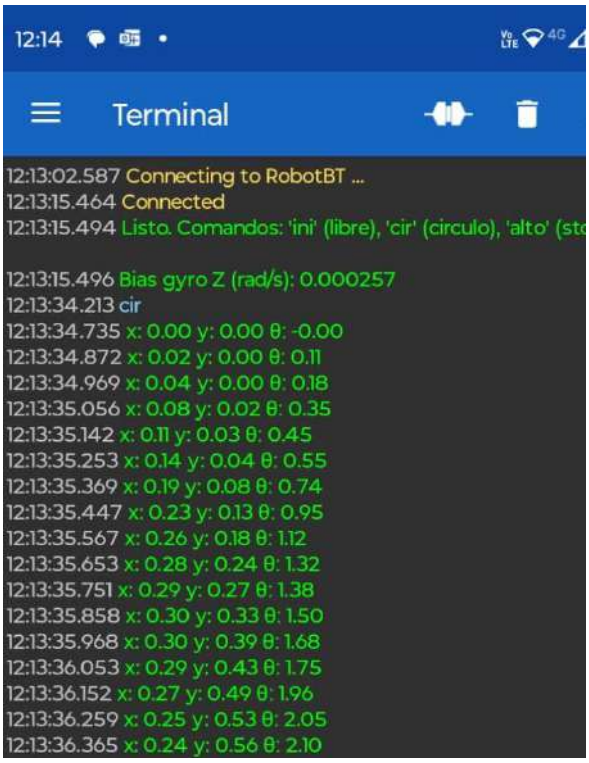


Figura 4. Captura de pantalla de la terminal serial de comunicación por Bluetooth del RMAR.

También se presentan los comandos de funcionamiento en el diagrama de flujo de la figura 5.

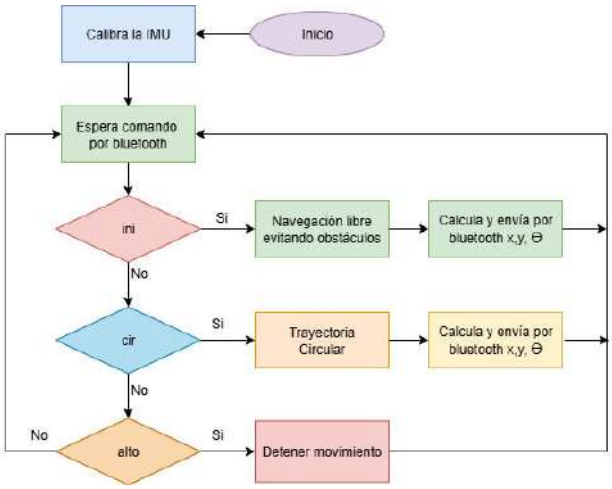


Figura 5. Diagrama de flujo del funcionamiento del RMAR.

La característica principal de un RMA es su habilidad para navegar sin interrupción generando una nueva trayectoria local libre de riesgos cuando se detecta un obstáculo imprevisto y modifica la ruta para asegurar una mínima afectación en el rendimiento deseado (Loganathan et al., 2023). Por lo que la rutina de navegación autónoma con evasión de obstáculos ejecutada por el RMAR al recibir el comando "ini" se muestra en el diagrama de flujo de la figura 6, la cual inicia leyendo el giroscopio correspondiente al eje z de la IMU, para fusionar esta lectura con los datos de la odometría realizada por los codificadores ópticos y transmitir sus coordenadas (x,y,Θ) por Bluetooth, a continuación se miden las distancias que tiene el robot hacia el frente (d_F), a la derecha (d_R) y a la izquierda de su desplazamiento (d_L) con sus sensores ultrasónicos correspondientes, en el caso de que d_F sea mayor que el umbral, el cual se fijó en 20 cm se moverá hacia adelante durante 100 ms, de lo contrario evalúa si $d_R > d_L$ y además si $d_R >$ umbral, entonces girará a la derecha, en caso contrario evalúa si $d_L >$umbral girará a la izquierda, si no se cumplen estas condiciones, entonces el RMAR se desplazará en reversa durante 300 ms y después realizará una vuelta a la derecha.

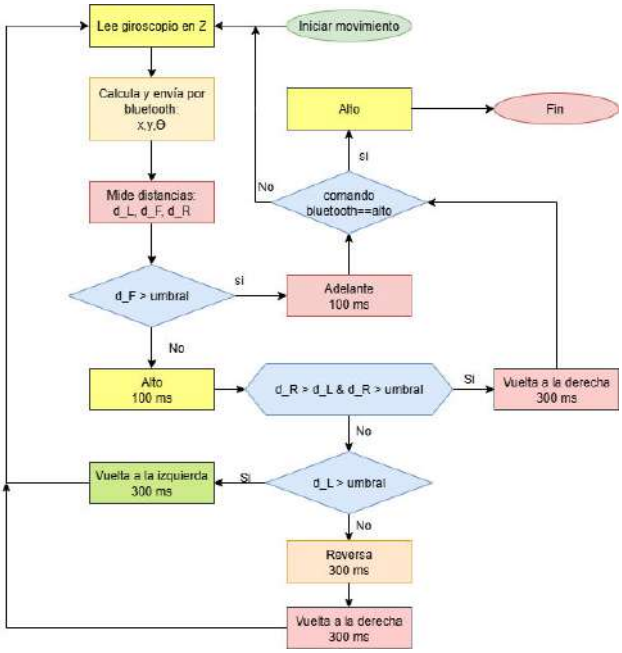


Figura 6. Rutina de navegación autónoma con evasión de obstáculos.

Además, en este modo de operación el RMAR disminuye su velocidad proporcionalmente cuando se acerca a una pared o a algún obstáculo, como se aprecia en el fragmento de código mostrado en la figura 7, en donde d_max y d_min corresponden a 50 cm y 10 cm respectivamente.

```
int velocidadProporcional(float distancia) {
  if (distancia >= d_max) return vel_max;
  if (distancia <= d_min) return vel_min;
  float k = (vel_max - vel_min) / (d_max - d_min);
  return vel_min + k * (distancia - d_min);
}
```

Figura 7. Función de cálculo de velocidad proporcional.

En el caso de que el comando transmitido por el usuario sea "cir" el robot realizará una trayectoria circular mediante el código de la función *moverEnCirculo* mostrado en la figura 8, en donde *r* es el radio entre las ruedas, *vL* y *vR* son las velocidades lineales de las ruedas izquierda y derecha respectivamente, *L* es la distancia entre las ruedas y *R* es el radio deseado del círculo, en un giro la rueda interna recorre un círculo más pequeño que la externa. Se convierte la velocidad lineal en angular y se escala a un valor de PWM, asegurando que este valor esté entre la velocidad mínima y máxima, mediante la función *constrain(),* durante este movimiento también el RMAR enviará periódicamente sus coordenadas.

```
void moverEnCirculo(float R, float vel_lineal) {
  float vL = vel_lineal * (R - (L / 2.0)) / R;
  float vR = vel_lineal * (R + (L / 2.0)) / R;

  int pwmL = constrain((vL / (2 * PI * r)) * 255, vel_min, vel_max);
  int pwmR = constrain((vR / (2 * PI * r)) * 255, vel_min, vel_max);

  M1_adelante(pwmR);  // M1 es motor derecho
  M2_adelante(pwmL);  // M2 es motor izquierdo
}
```

Figura 8. Función para que el RMAR realice una trayectoria circular.

Para detener cualquiera de las dos opciones de movimiento del robot, se envía el comando "alto". Se seleccionaron palabras cortas para los comandos del robot con la finalidad de facilitarle al usuario la interacción con él mediante la interfaz serial.

2.3 Script en Python

Una vez que el RMAR ha concluido uno de sus recorridos, se realiza un post procesamiento de los datos que ha transmitido por bluetooth mediante un programa realizado en Python, cuyo pseudo código se muestra a continuación:

```
1. IMPORTAR librerías necesarias:
   - re (para expresiones regulares)
   - numpy (para manejo de arrays)
   - matplotlib.pyplot (para graficar)

2. DEFINIR variable "raw_data" que contiene el bloque de texto con las posiciones del robot

3. DEFINIR patrón de búsqueda "pose_pattern" para extraer coordenadas x e y usando expresiones regulares

4. BUSCAR todas las coincidencias de coordenadas en "raw_data" usando el patrón "pose_pattern"
   - GUARDAR resultados en la lista "matches"

5. CONVERTIR cada par (x, y) en "matches" a centímetros
   - MULTIPLICAR cada valor por 100
   - GUARDAR en array "trajectory" como lista de pares [x, y]

6. CREAR figura para graficar con tamaño 8x6

7. GRAFICAR la trayectoria del robot:
   - Usar puntos conectados por líneas
   - Etiquetar como "Trayectoria del Robot"

8. CONFIGURAR gráfico:
   - Título: "Trayectoria Recorrida"
   - Etiquetas de ejes: "X (cm)" y "Y (cm)"
   - Escala igual en ambos ejes
   - Activar cuadrícula
   - Mostrar leyenda

9. PARA cada par consecutivo de puntos en "trajectory":
   - CALCULAR diferencia en x ("dx") y en y ("dy")
   - DIBUJAR flecha desde punto actual hacia el siguiente

10. MOSTRAR gráfico

FIN
```

El usuario recibe los datos que el robot ha enviado, mediante una terminal serial y los copia en el script, los cuales se les denominó "raw_data", debido a que los datos enviados por el robot tienen datos adicionales, como la confirmación de la conexión establecida, la hora de envío, etc. se define el patrón de búsqueda "pose_pattern" para extraer de los datos crudos las coordenadas (x,y,Θ) para finalmente graficar la trayectoria estimada, como se detalla en el pseudo código del script.

2.4 Fusión de datos

Se muestra en la figura 9 una sección del código fuente del ESP32, en donde se observa el cálculo por odometría del incremento de la orientación *dTheta_enc* mediante (3) , que se fusiona con el incremento de la orientación proporcionada por el giroscopio de la IMU en la orientación Z *dTheta_gyro*, usando (7) con el factor de ponderación ajustado experimentalmente $BLEND_{YAW}=0.6$ dándole un peso ligeramente mayor al giroscopio que a la odometría, con la finalidad de compensar la acumulación de errores debido a posibles deslizamientos de las ruedas con el piso y así obtener el cálculo del incremento del ángulo de orientación del robot *dTheta*, para obtener finalmente las coordenadas (x,y,Θ) del RMAR, de acuerdo con (4), (5), y (6).

```
// Odometría con encoders
float dL = deltaLeft * distancia_pulso;
float dR = deltaRight * distancia_pulso;
float dC = (dL + dR) / 2.0;

// Calcular dt para integración
unsigned long now_ms = millis();
float dt_odo = (now_ms - t_odo_ms) / 1000.0f;
if (dt_odo <= 0) dt_odo = 0.001f;
t_odo_ms = now_ms;

// Fusión encoders + giroscopio
float dTheta_enc  = (dR - dL) / L;
float dTheta_gyro = gyroZ_rads * dt_odo;
float dTheta = (1.0f - BLEND_YAW) * dTheta_enc + BLEND_YAW * dTheta_gyro;

// Actualización posición con orientación intermedia
float theta_mid = theta + dTheta / 2.0;
x += dC * cos(theta_mid);
y += dC * sin(theta_mid);
theta += dTheta;
```

Figura 9. Sección del código del RMAR correspondiente a la fusión de datos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron pruebas del funcionamiento del RMAR en un espacio confinado de trabajo de 3.4 m x 2.4 m como se observa en la figura 10, con la finalidad de que pudiera navegar libremente de manera autónoma dentro de ella y poder cuantificar el error reportado en las trayectorias estimadas, así como su exactitud relativa que se calculará con (8) y mediante (9) el error raíz cuadrático medio (E_{RMS}) de los experimentos realizados.

$$Exactitud = 1 - \frac{|valor\ estimado - valor\ real|}{valor\ real} \quad (8)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (9)$$

Figura 10. Espacio confinado de trabajo de 3.4 x 2.4 m.

En la figura 11 se observa la trayectoria estimada del RMAR girando sobre una de sus ruedas graficada con el script de Python a partir de las coordenadas (x,y,Θ) enviadas por el RMAR, cada punto azul representa las coordenadas enviadas por el robot y la flecha roja su dirección de desplazamiento, se observa que la trayectoria estimada corresponde a un círculo de 0.15 m de diámetro, que es precisamente a la distancia entre la superficie de contacto de las ruedas del robot, y considerando que el origen de coordenadas de la trayectoria estimada está ubicado en el centro del RMAR, concluimos que en este experimento no existe error, o equivalentemente la exactitud es del 100%, lo que corresponde al experimento 1 reportado en la tabla 2.

Para el experimento mostrado en la figura 12, observamos que el robot realizó una trayectoria circular de 0.3 m de diámetro en el ángulo inferior izquierdo del espacio de trabajo, se desplazó en una trayectoria curvilínea hasta llegar al extremo superior derecho de la figura, en donde nuevamente realizó la misma trayectoria circular, se aprecia que la trayectoria estimada representa un espacio de 3 m en el eje x y 2.8 m en el eje y, considerando que el espacio de trabajo es de 3.4 m x 2.4 m, por lo que podemos concluir que en este experimento existe un error de 0.4 m en cada eje y equivalentemente una exactitud relativa de 88.24% y 88.33% respectivamente, obtenidas usando (8), estos valores se reportan en la tabla 2.

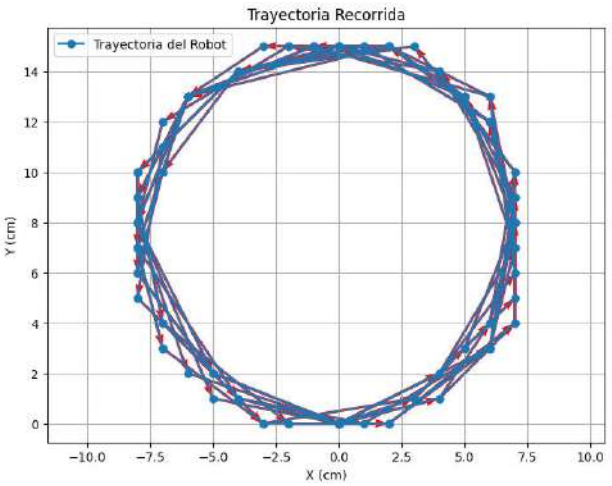


Figura 11. Trayectoria del RMAR girando sobre una rueda.

En el experimento de la figura 13 considerando la trayectoria estimada del círculo observamos que tiene un diámetro de 0.58 m en el eje X, y 0.78 m en el eje Y, cuando el radio deseado es de 0.3 m y equivalentemente un diámetro de 0.6 m, observamos que existe un error de 0.18 m y una exactitud relativa de 70%. En la Tabla 2 se muestran los errores y las exactitudes relativas calculadas mediante (8), de los doce experimentos realizados, en donde los experimentos del 5 al 8 corresponden a una trayectoria circular con un radio de 0.2 m y del 9 al 12 con un radio de 0.3 m, se observa que se obtiene un error promedio de 0.12 m, una exactitud relativa promedio del 87.35% así como un E_{RMS}= 0.18 m, obtenido usando (9), en los doce experimentos realizados.

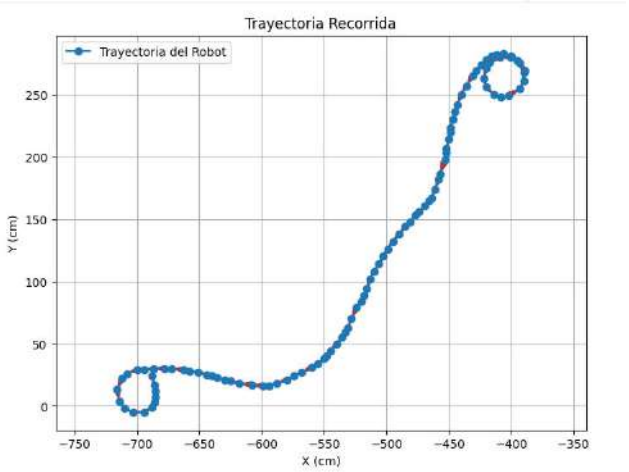


Figura 12. Trayectoria combinada: circular y navegación libre.

En la tabla 3 se muestra la propuesta del RMAR frugal comparada con los trabajos relacionados mencionados en la sección 1.1, en donde a partir de la información proporcionada en los artículos respectivos, se realizó una estimación de los costos de los prototipos utilizados, cotizados en el mercado

nacional, ya que los autores no reportaron explícitamente esta información. Observamos que Chica et al. (2009) y Yoon et al. (2025) usaron robots comerciales para realizar sus experimentos y consecuentemente son los que tienen el mayor costo. Tran-Ngoc et al. (2025) y Teng et al. (2024) integraron sus prototipos utilizando periféricos muy costosos como una cámara infra roja de 32x 32 pixeles y un LiDAR respectivamente, lo que repercutió en el alto costo de los prototipos.

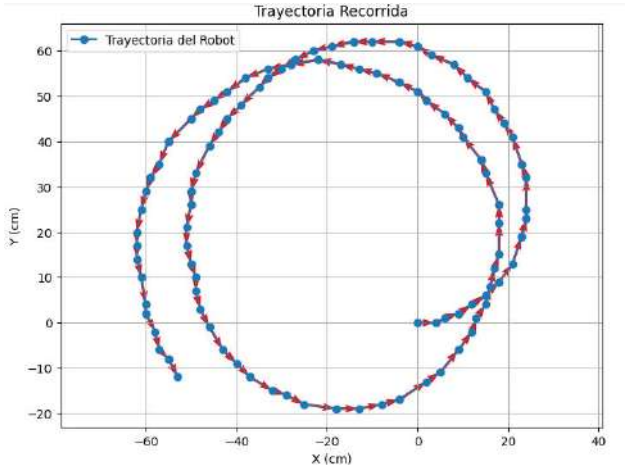


Figura 13. Trayectoria circular estimada del RMAR.

Tabla 2. Error, exactitud y error RMS de los experimentos realizados

Experimento	Real (m)	Estimado (m)	Error (m)	Exactitud Relativa
1	0.15	0.15	0	100.00 %
2	0.15	0.14	0.01	93.33%
3	3.4	3	0.4	88.24 %
4	2.4	2.8	0.4	88.33%
5	0.4	0.38	0.02	95.00%
6	0.4	0.39	0.01	97.50%
7	0.4	0.46	0.06	85.00%
8	0.4	0.47	0.07	82.50%
9	0.6	0.58	0.02	96.67%
10	0.6	0.78	0.18	70.00%
11	0.6	0.65	0.05	91.67%
12	0.6	0.81	0.21	65.00%
Valores medios			0.12	87.35%
Error RMS (m)			0.18	

En el trabajo de Zamudio et al. (2023) usaron un kit básico de un robot, similar al que se usó para el RMAR frugal y con un costo menor, sin embargo, no es un robot autónomo, sino que es controlado inalámbricamente mediante bluetooth.

Con respecto al desempeño, se observa en la tabla 3 que en el trabajo de Chica et al. (2009) a pesar de ser el prototipo mas oneroso por utilizar el Robot Kephera II, fabricado por la compañía suiza K-Team SA y actualmente descontinuado, no reportó cuantitativamente su desempeño, solo mencionó que "tuvo mejor desempeño que el vehículo de Braitenberg 3". En el trabajó de Zamudio et al. (2023) no se reportó alguna métrica de desempeño debido a que su prototipo no es autónomo. El prototipo de RMAR frugal solamente está un 7.65% por debajo del prototipo de mayor desempeño mostrado en la tabla 1, que fue el de Tran-Ngoc et al. (2025).

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un prototipo frugal de Robot Móvil Autónomo de Ruedas (RMAR), empleando componentes comerciales de bajo costo y fácil adquisición. El sistema es capaz de ejecutar tareas de navegación autónoma, incluyendo la evasión de obstáculos y el desplazamiento en una trayectoria circular con radios de 0.2m y de 0.3 m. La estimación de la trayectoria se realizó mediante la fusión de datos de odometría y del giroscopio en el eje Z de la Unidad de Medición Inercial (IMU), procesados posteriormente en Python.

Tabla 3. Comparación del prototipo del RMAR con los reportados en la sección de trabajos relacionados

Autor	Componentes	Costo estimado	Desempeño reportado
Chica et al. (2009)	Robot Kephera II, CMU CAM2	$25 000.00	Mejora en el comporta-miento
Yoon et al. (2025)	Robot Turtlebot3	$16 226.00	Exactitud 90.1%
Tran-Ngoc et al. (2025)	MCU CC1352R, cámara IR 32 x 32 pixeles, IMU, PCB	$8 617.00	Error < 1 m, exactitud 95%
Teng et al. (2024)	LiDAR, RaspBerry Pi4B, STM32, IMU	$2 394.00	Exactitud 91.6%
Zamudio et al. (2023)	Arduino Uno, Kit básico robot 2 ruedas, Módulo Bluetooth HC06	$431.00	No Aplica
RMAR Frugal	ESP32, Kit básico robot 2 ruedas, Sensores HC-SR04, IMU	$811.00	Error RMS 0.18m, Exactitud 87.35%

La inclusión de la IMU resultó fundamental para mitigar la acumulación de errores propios de la odometría, logrando una mejora significativa en la precisión de la estimación de posición. Los resultados reportan una exactitud promedio del 87.35% y un error E_{RMS} de 0.18 m.

A pesar de la simplicidad de los componentes utilizados, la conectividad del microcontrolador ESP32 permitió establecer una interfaz inalámbrica con un teléfono inteligente, facilitando la visualización y recepción de coordenadas (x,y, Θ) para el trazado de la trayectoria estimada en Python. El uso de herramientas de código abierto y libre de licencia refuerza el carácter frugal del prototipo, ofreciendo una alternativa accesible para investigadores, estudiantes y entusiastas que no disponen de plataformas comerciales ni de software propietario.

La fusión ponderada de los datos del giroscopio y de los codificadores infrarrojos es muy elemental y como trabajo futuro se planea sustituirla por un filtro de Kalman Extendido, el cual permitirá predecir con mayor precisión el estado futuro de las coordenadas (x,y,Θ).

REFERENCIAS

Chica R., M.T., Pineda C., A.L. and Esmeral P., M.A. (2009). Sistema de navegación para robots móviles utilizando fusión sensorial. *Tecnura,* 13(25), pp.128–135. Bogota, Colombia.

Loganathan, A., & Ahmad, N. S. (2023). A systematic review on recent advances in autonomous mobile robot navigation. *Engineering Science and Technology, an International Journal,* pp. 1-26. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101343

Mahmud, S. A., Kamarulariffin, A., Ibrahim, A. M., & Mohideen, A. J. H. (2024). Advancements and challenges in mobile robot navigation: A comprehensive review of algorithms and potential for self-learning approaches. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. https://doi.org/10.1007/s10846-024-02149-5

Siciliano, B. & Khatib, O. (2016). *Springer Handbook of Robotics*. Springer-Verlag, Berlin.

Teng, X., Shen, Z., Huang, L., Li, H. & Li, W. (2024). Multi-sensor fusion based wheeled robot research on indoor positioning method. *Results in Engineering*, 22, 102268, pp.1–9. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102268

Tran-Ngoc, P.T., Nguyen, H.D., Le, D.L., Li, R., Chong, B.S. and Sato, H. (2025). Gait-adaptive IMU-enhanced exploration strategy for autonomous search and rescue with insect-machine hybrid system, *npj Robotics*, 3(20), Singapore. https://doi.org/10.1038/s44182-025-00037-0

Tzafestas, S.G. (2014). *Introduction to Mobile Robot Control*. Elsevier, USA.

Yasuda, Y.D.V., Cappabianco, F.A.M. and Martins, L.E.G. (2024). Warehousing and Material Handling Systems for the Digital Industry. *Mobile Robots and Autonomous Indoor Navigation*. USA.

Yoon, J. & Kim, S. (2025). *RLRL: Robust Low-cost robot localization on diverse road surfaces via wheel encoder*. Measurement, 256, 118276, pp.1–14. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118276

Zamudio Beltrán, Z., Salmerón Guerrero, R., Lozano Andrade, F., Ambrosio Bastián, J. & Mones Rosas, D. (2023). Desarrollo de un vehículo robótico como herramienta para mejorar la educación STEM. *Congreso Internacional de Mecatrónica, Control e Inteligencia Artificial*, pp.99–103 UNAM, FESC, Estado de México.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Design and Modeling of Integrated Circuits for Environmental Sensing, Biomedical and Microfluidic Applications

Díaz Domínguez, Arturo Emmanuel *, Diaz Villegas, Arturo *, Sandoval Erazo, José Ángel *, Hernández Barreto, Alan Daleth *, Velasco Campos, María Fernanda *, Ocampo Castrejón, Daniela Alexandra *, Morales Escobar, Karol Yenaro *

** Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ciencias Básicas. Avenida Tecnológico #27, Colonia Plan de Ayala, 62780, Zacatepec de Hidalgo, Morelos. México. (e-mail: {arturo.dd, arturo.dv, l21090859, l23090959, l23091061, l25091296, l23090998}@zacatepec.tecnm.mx).*

Abstract: This research addresses the growing need for cost-effective and accessible electronic devices for environmental, biomedical, and microfluidic applications by developing a methodology for the design, digital modeling, and rigorous computational validation of integrated circuits. The main objective is to create functional microchips optimized for simplified lithographic processes while promoting academic training in professional design tools. The methodology consists of three stages: functional and architectural design, digital modeling, and rigorous verification through Design Rule Checks (DRC) and electrical symmetry analysis. Two microchip configurations were developed: a resistive device with variable track geometries, and a capacitive device based on interdigitated electrodes. Designs were implemented using specialized software to ensure compatibility with standard fabrication processes. Preliminary results, derived from the computational validation, confirm that both designs meet the technical and geometric specifications for future fabrication and experimental characterization, establishing a solid foundation for developing versatile sensors. Future work will focus on securing specialized infrastructure for cleanroom fabrication, precise encapsulation, and performance evaluation under real conditions to validate technological and industrial feasibility. This approach represents a significant step toward democratizing microfabrication technologies in academic environments.

Keywords: Environmental sensing, biomedical applications, microfluidics, integrated circuits, microchip design.

1. INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento de las tecnologías emergentes en áreas como la salud, el medio ambiente y la microfluídica ha generado una demanda creciente de dispositivos electrónicos especializados, capaces de ofrecer soluciones tecnológicas accesibles, eficientes y de bajo costo. Esta tendencia responde a la necesidad de integrar sensores inteligentes en sistemas de monitoreo, diagnóstico y análisis, que puedan operar en tiempo real y con alta precisión en entornos complejos. La evolución de estos sistemas ha sido impulsada por la miniaturización de componentes, el desarrollo de nuevos materiales funcionales y la mejora de los procesos de fabricación, lo que ha permitido ampliar el alcance de la electrónica hacia aplicaciones antes consideradas inviables por limitaciones técnicas o económicas.

En este contexto, “los semiconductores son la base de la economía digital moderna y el eje de los avances en metotecnologías críticas como la Inteligencia Artificial (IA), las redes 5G y los sistemas militares avanzados” (Medina y Ullauri, 2025), es decir, construyen un puente para la modernización, siendo indispensables para cualquier innovación y desarrollo tecnológico. Su versatilidad y capacidad de miniaturización permiten la creación de dispositivos funcionales que pueden integrarse en plataformas portátiles, sistemas embebidos y entornos de investigación avanzada. Además, los semiconductores son fundamentales para el desarrollo de sensores que operan bajo principios físicos como la variación de resistencia, capacitancia o permitividad dieléctrica, lo que los convierte en elementos clave para la detección de estímulos ambientales, químicos o biológicos.

Con la venida de nuevas tecnologías, la microfabricación de chips ha ganado una notable relevancia en aplicaciones biomédicas, ambientales e industriales. En este campo, “los dispositivos microfluídicos abren la puerta a nuevas posibilidades de investigación y ensayos que revolucionen el desarrollo de medicamentos y otras áreas de la biomedicina” (Platero Dueñas, 2023), lo que subraya su potencial para transformar la investigación clínica y farmacológica. Estos dispositivos permiten manipular volúmenes extremadamente pequeños de fluidos, lo que facilita el análisis de muestras biológicas con alta eficiencia y precisión. Este avance se ve palpable a través de procesos de fabricación aditiva como la estereolitografía, donde se permite la creación de dispositivos

para realizar ensayos de manera más rápida, eficiente y económica. Sin embargo, su implementación aún enfrenta retos importantes, como la falta de experiencia técnica, la escasa disponibilidad de infraestructura especializada y la necesidad de fortalecer la formación académica en procesos de diseño y validación de prototipos. La brecha entre el diseño conceptual y la fabricación efectiva de estos dispositivos requiere ser abordada mediante metodologías integrales que incluyan herramientas digitales, simulación computacional y verificación estructural.

El presente trabajo aborda esta problemática desde un enfoque académico-práctico, en el marco del proyecto impulsado por el Tecnológico Nacional de México en colaboración con el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). Se reportan los avances en el diseño y validación de circuitos integrados con aplicaciones potenciales en sensado ambiental, biomédico y microfluídico, destacando la importancia de la capacitación de estudiantes en el uso de herramientas profesionales como KLayout y KiCAD, que permiten desarrollar habilidades técnicas en diseño electrónico, modelado digital y verificación estructural. Estas herramientas proporcionan entornos de trabajo robustos para la creación de layouts, esquemas eléctricos y simulaciones, lo que facilita la transición del diseño conceptual a la fabricación litográfica y la integración en sistemas de prueba.

El software KiCad es “una aplicación de software libre para diseño electrónico automatizado (EDA = Electronic Design Automation), es un proyecto inicializado en 1992 por Jean-Pierre Charras y que continúa en desarrollo gracias a una comunidad que se denomina como KiCad Developers Team” (Medrano, 2017). Esta herramienta permite la creación de esquemas eléctricos, diseño de placas de circuito impreso (PCB) y organización de componentes, siendo ampliamente utilizada en entornos académicos y profesionales por su flexibilidad y licencia abierta. Por su parte, KLayout es un visor y editor de layouts para circuitos integrados, utilizado principalmente en el diseño físico de semiconductores. Esta herramienta permite visualizar, editar y verificar archivos GDSII y OASIS, que son formatos estándar en la industria para representar la geometría de los chips, facilitando la transición del diseño conceptual a la fabricación litográfica. Su capacidad para realizar verificaciones de reglas de diseño (DRC) y su compatibilidad con scripts personalizados la convierten en una herramienta esencial para la validación estructural de dispositivos microfabricados.

Este artículo presenta resultados parciales correspondientes a la etapa de diseño y validación computacional, los cuales constituyen la base para la posterior fabricación y caracterización experimental de los circuitos. Se busca con ello establecer un modelo metodológico replicable que contribuya al desarrollo de sensores funcionales, accesibles y adaptables a las necesidades tecnológicas del país. Además, se pretende fomentar el uso de herramientas libres y accesibles en el ámbito académico, promoviendo la formación de talento especializado en microelectrónica, diseño de sensores y tecnologías emergentes.

Aunque el proyecto ha culminado con la generación de los archivos litográficos (GDSII) para la fabricación (y en algunos casos, con la fabricación misma de los wafers o dies), el alcance del presente artículo está rigurosamente restringido a la fase de Diseño, Modelado Digital y Validación Computacional. Esta limitación se debe a la ausencia de infraestructura especializada en el entorno académico, específicamente la falta de equipos de precisión para el encapsulado, soldadura (wire bonding) y la caracterización eléctrica de microchips a microescala, lo cual impide la obtención de mediciones experimentales y curvas de respuesta en tiempo real. Por consiguiente, el foco se pone en demostrar la robustez geométrica y la viabilidad técnica del diseño conforme a los estándares industriales.

2. METODOLOGÍA

La metodología para el desarrollo de los microchips se ha concebido como una secuencia de etapas interdependientes, articuladas para abarcar desde la conceptualización de los principios de funcionamiento de los dispositivos hasta su validación en un entorno de simulación digital.

El propósito fundamental de este enfoque metodológico es la obtención de dispositivos microfabricados funcionales, diseñados para manifestar una respuesta cuantificable a estímulos ambientales a través de variaciones en sus propiedades eléctricas, específicamente resistencia y capacitancia. Todo el proceso se basa en la implementación de estructuras geométricas de baja complejidad sobre un sustrato de silicio, lo que optimiza la viabilidad técnica y los costos de producción.

2.1 Diseño Funcional y Arquitectónico de los Dispositivos

En la etapa inicial, se procedió a la definición funcional y arquitectónica de los dispositivos, lo que resultó en dos configuraciones de microchips diferenciadas. Esta fase implicó un análisis detallado de los mecanismos físicos que permiten la detección de estímulos ambientales mediante variaciones eléctricas, así como la selección de materiales y geometrías que maximicen la sensibilidad y estabilidad de los dispositivos.

El primero, un dispositivo de tipo resistivo, se diseñó con un patrón geométrico de pistas conductoras cuyas dimensiones de longitud y sección transversal fueron moduladas en tres variantes (R1, R2 y R3). Esta configuración permite inducir cambios medibles en la resistencia eléctrica, lo que establece una correlación directa entre la geometría del material y su respuesta bajo diversas condiciones ambientales, como temperatura, presión o exposición a gases. La variabilidad geométrica fue definida con base en simulaciones previas que permitieron estimar el rango de sensibilidad esperado para cada variante.

El segundo, un dispositivo de tipo capacitivo, se basó en una arquitectura de electrodos interdigitados. La separación entre las líneas y la densidad de los electrodos se ajustaron con precisión para generar capacitancias diferenciales, lo que habilita su funcionamiento como un elemento sensor de alta sensibilidad capaz de detectar variaciones en la humedad o cambios en la permitividad dieléctrica de los medios que lo rodean. Este tipo de arquitectura es especialmente útil en aplicaciones de análisis de fluidos, donde se requiere una

respuesta rápida y precisa ante cambios en el entorno. Se consideraron también aspectos como la minimización de interferencias y la optimización del área activa del sensor.

2.2 Implementación del Diseño y Modelado Digital

La segunda etapa se centró en la implementación del diseño y el modelado digital, para lo cual se emplearon herramientas de software especializadas que permiten traducir los conceptos arquitectónicos en estructuras físicas listas para ser fabricadas. Esta fase es crítica para garantizar la precisión geométrica y la compatibilidad con los procesos de litografía utilizados en la microfabricación.

Se utilizó KLayout para la construcción precisa de las máscaras en formato GDSII, un estándar de la industria que permite transferir los patrones litográficos al sustrato de silicio con alta fidelidad. Esta herramienta fue seleccionada por su capacidad para manejar diseños complejos, su compatibilidad con scripts personalizados y su eficiencia en la verificación de reglas de diseño (DRC).

De forma complementaria, KiCAD se empleó para el diseño esquemático y la organización de los contactos eléctricos, facilitando la integración de los microchips en futuros sistemas de prueba. Esta herramienta permitió definir las conexiones eléctricas internas y externas de los dispositivos, así como simular su comportamiento en condiciones operativas.

Una consideración clave en esta fase fue la simplificación de los procesos de fabricación al limitar el diseño a una única capa activa de silicio, complementada por una capa de corte adicional destinada a exponer las regiones críticas. Esta estrategia garantiza la accesibilidad para la interacción con el entorno externo sin complejizar la microfabricación, lo que resulta en una reducción significativa de los costos y tiempos de producción. Además, se contempló la posibilidad de escalar el diseño para futuras versiones con mayor funcionalidad o integración en sistemas embebidos.

2.3 Verificación Geométrica (DRC) y Validación Funcional Computacional

Posteriormente, en la tercera etapa, se llevó a cabo una validación del diseño en dos frentes complementarios: una verificación de la integridad estructural (geométrica) y una validación del comportamiento eléctrico esperado (funcional-computacional).

El primer frente fue la Verificación Geométrica (DRC). Utilizando las herramientas de KLayout, se ejecutó una rigurosa verificación de reglas de diseño (Design Rule Check, DRC) para detectar errores geométricos y de compatibilidad antes de la fabricación. Este proceso sistemático evaluó la integridad física de las estructuras, comprobando la continuidad de las pistas resistivas, la separación mínima entre los electrodos capacitivos, la correcta delimitación de las áreas activas y el análisis exhaustivo de la simetría y repetibilidad de los patrones geométricos. Esta fase garantizó que los diseños fueran geométricamente robustos y compatibles con los estándares de micro fabricación.

El segundo frente fue la Validación Funcional Computacional, en esta etapa, crucial para trascender la mera revisión geométrica, se centró en corroborar que la geometría diseñada generaría una respuesta eléctrica medible y funcional. Se realizaron simulaciones eléctricas preliminares para verificar el comportamiento esperado de los dispositivos bajo condiciones estándar. Estas simulaciones permitieron estimar los parámetros eléctricos base (que se reportan cuantitativamente en la Sección 3, Tabla 1), tales como la resistencia base del dispositivo resistivo (estimada en 5.2 Ω para R2) y la capacitancia base del dispositivo capacitivo (estimada en 8.5 fF en ambiente seco). Esta simulación proporcionó la primera evidencia cuantitativa de la viabilidad funcional del diseño, utilizando unidades del Sistema Internacional (SI) como referencia principal.

2.4 Proyección de Aplicaciones Potenciales

Finalmente, se realizó una proyección de los escenarios de aplicación potenciales, con el objetivo de vincular la funcionalidad inherente de los microchips a necesidades prácticas en diversos campos científicos, industriales y tecnológicos. Esta etapa permitió establecer una visión estratégica del impacto que podrían tener los dispositivos desarrollados en contextos reales de uso.

El microchip resistivo se proyectó para su uso en el monitoreo de variaciones ambientales, como cambios de temperatura, presión o presencia de gases, así como en la caracterización de materiales donde la conductividad o resistencia eléctrica es un indicador clave. Su diseño modular permite adaptarlo a diferentes entornos, desde laboratorios de investigación hasta sistemas embebidos en dispositivos portátiles.

Por otro lado, el dispositivo capacitivo se consideró idóneo para aplicaciones como la detección de humedad, el análisis de fluidos en plataformas microfluídicas, y la evaluación de medios en pruebas biomédicas, donde la variación de la permitividad dieléctrica puede ser utilizada como parámetro de diagnóstico. Su arquitectura de electrodos interdigitados le confiere una alta sensibilidad y resolución, lo que lo hace

especialmente útil en entornos donde se requiere precisión y respuesta rápida.

De esta manera, el diseño de los microchips no se limitó a un mero ejercicio de prototipado, sino que se estableció como una base sólida para el desarrollo de sensores versátiles con un alto potencial en entornos académicos, industriales y de investigación aplicada. En conjunto, la metodología aquí implementada establece un proceso robusto, reproducible y escalable para la validación de microchips en el entorno CAD. Al integrar el diseño conceptual (Sección 2.1), el modelado digital (Sección 2.2) y una validación dual que comprende tanto la verificación geométrica (DRC) como la simulación de comportamiento eléctrico (Sección 2.3), se logra una validación computacional rigurosa previa a la fabricación. Esto, sumado a la proyección de aplicaciones (Sección 2.4), establece una base sólida para la creación de microchips funcionales en silicio mediante técnicas de litografía accesibles y compatibles con estándares internacionales.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos corresponden a la etapa de diseño y validación computacional de dos circuitos integrados desarrollados mediante las herramientas KLayout y KiCAD. Ambos diseños fueron configurados sobre una única capa de silicio, acompañada de una capa adicional destinada a la exposición de la región activa, lo cual optimiza el proceso de micro fabricación.

Las estructuras diseñadas fueron sometidas a verificación de reglas de diseño (DRC), confirmando la integridad geométrica y la correcta separación entre electrodos. Este proceso geométrico confirmó que los diseños cumplen con los requisitos de compatibilidad técnica para su futura fabricación litográfica.

En la Figura 1 se presenta el layout del Chip 1 (resistivo), que integra tres configuraciones (R1, R2, R3) con anchos de pista variables, oscilando entre 20-30 µm. La Figura 2 muestra el Chip 2 (capacitivo), basado en una arquitectura de electrodos interdigitados; en este diseño, las pistas paralelas (aletas) mantienen una separación y ancho críticos del orden de 10-15 µm, optimizados para la detección de cambios en la permitividad dieléctrica. Ambas imágenes fueron generadas en formato GDSII.

La Tabla 1 resume los principales parámetros geométricos y funcionales de ambos dispositivos. De forma crucial, se incluye una nueva columna con los parámetros eléctricos estimados mediante simulación computacional, que constituyen la validación funcional preliminar de este trabajo. Para el Chip 1 (resistivo), la configuración intermedia (R2) presenta una resistencia base estimada de 5.2 Ω. Para el Chip 2 (capacitivo), se estimó una capacitancia base en ambiente seco (aprox. 10 % HR) de 8.5 *fF*.

Estos valores simulados, aunque preliminares, son fundamentales, ya que proporcionan una línea base cuantitativa y demuestran que los diseños son funcionalmente viables. Evidencian que los prototipos no solo cumplen con las especificaciones técnicas y geométricas para la fabricación, sino que también poseen los parámetros eléctricos esperados para interactuar con estímulos ambientales. El desempeño funcional en condiciones reales será determinado en la etapa de caracterización experimental.

Fig. 1. Chip 1

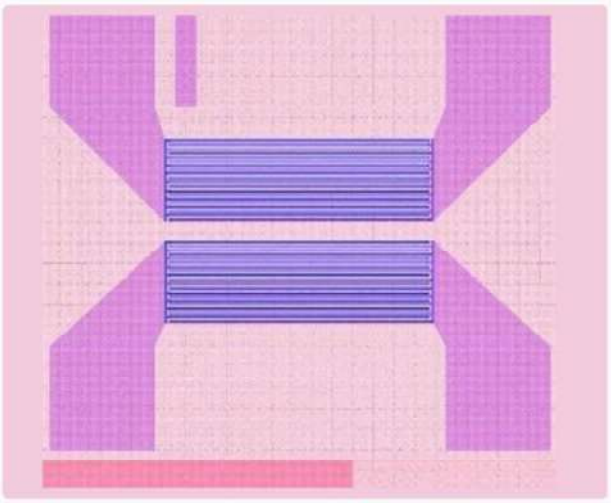


Fig. 2. Chip 2

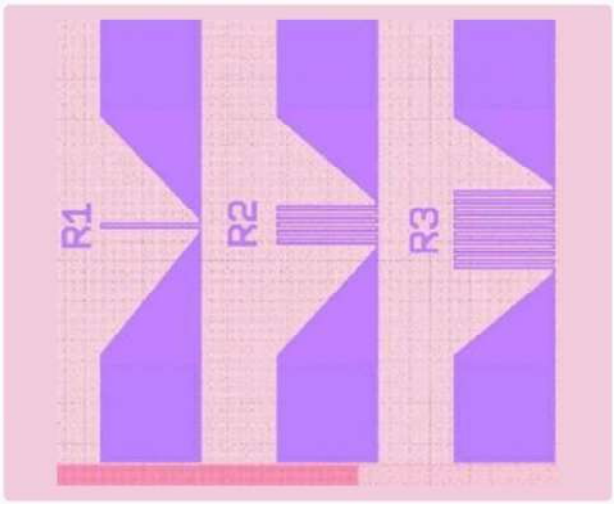


Tabla 1. Parámetros geométricos y funcionales.

Parámetro	Chip 1 (R1–R3 en serie)	Parámetro Eléctrico Estimado (Simulación)	Chip 2 (estructura con aletas)	Funcionalidad esperada
Dimensiones totales	2000 × 1500 µm (aprox.)	N/A	2000 × 2000 µm (aprox.)	Compatibilidad con procesos estándar de

				litografía sencilla
Número de resistores	3 (R1, R2, R3)	N/A	2 regiones activas principales	Generación de respuesta eléctrica diferenciada
Ancho de pista	20–30 µm (diseño variable)	Rbase =5.2 Ω (Para R2)	10–15 µm (en aletas paralelas)	Control de resistencia eléctrica
Longitud de pista activa	200–300 µm	N/A	400–500 µm	Mayor superficie de interacción con estímulos
Espesor de capa	1 capa de silicio + capa activa adicional	N/A	1 capa de silicio + capa activa adicional	Exposición de la región activa para sensado
Tipo de contacto	Pads laterales para conexión eléctrica	N/A	Pads laterales y superiores	Facilitan mediciones eléctricas y de sensado
Aplicaciones previstas	Sensado resistivo (biomédico/ambiental)	Cbase =8.5 *fF* (en 10% HR)	Sensado microfluídico y biomédico	Implementación en plataformas de prueba y validación

3.1 Contraste con el Estado del Arte

Para evaluar la viabilidad del diseño propuesto, se realizó una comparación con rangos funcionales reportados en estudios recientes sobre sensores resistivos y capacitivos basados en silicio. Los valores simulados para el chip resistivo y el chip capacitivo se encuentran dentro de los rangos típicos reportados en la literatura.

Por ejemplo, Wang et al. (2025) destacan que los sensores resistivos para monitoreo ambiental presentan resistencias en el orden de decenas a cientos de ohmios, dependiendo de la geometría y el dopaje del silicio, lo que coincide con nuestro diseño. De manera similar, Zeng y Zeng (2025) reportan capacitancias en el rango de 100–1500 pF para sensores capacitivos interdigitados orientados a la detección de humedad, lo que confirma la pertinencia del valor obtenido en nuestras simulaciones. Finalmente, Cirstea et al. (2024) subrayan que metodologías de diseño simplificado y bajo costo, como la empleada en este trabajo, son esenciales para democratizar la microfabricación en entornos académicos.

Conclusión de la comparación: Los valores simulados son comparables a los rangos funcionales reportados en estudios recientes, como los de Wang et al. (2025) y Zeng & Zeng (2025), lo que confirma la viabilidad del diseño antes de la fabricación experimental.

3.2 *Limitaciones*

Entre las limitaciones del estudio se encuentra la ausencia, hasta el momento, de pruebas experimentales de los dispositivos en entornos reales, así como la falta de caracterización eléctrica de los chips fabricados. Aunque los diseños han sido validados digitalmente y sus parámetros eléctricos estimados por simulación, aún no se ha evaluado su comportamiento bajo condiciones operativas específicas.

Como estrategia futura, se plantea llevar a cabo la fabricación de los dispositivos en ambientes controlados de sala limpia. Posteriormente, se realizará la evaluación de desempeño bajo condiciones de sensado ambiental, biomédico y microfluídico, lo cual permitirá determinar su viabilidad tecnológica e industrial. Esta fase incluirá la medición de parámetros eléctricos como resistencia, capacitancia y respuesta dinámica.

4. CONCLUSIONES

La implementación metodológica desarrollada para la validación computacional rigurosa de microchips funcionales ha demostrado ser un proceso integral, sistemático y reproducible, capaz de articular desde la concepción teórica hasta la proyección de aplicaciones prácticas. A través de una secuencia de etapas claramente definidas —diseño funcional, modelado digital y verificación estructural (DRC y análisis de simetría) — se logró establecer una base sólida y geométricamente validada para el desarrollo de dispositivos sensores con potencial de adaptación a diversos entornos. A pesar de la imposibilidad actual de realizar pruebas experimentales por la limitación de infraestructura de caracterización a microescala, el diseño ha cumplido todos los requisitos técnicos para su futura fabricación y experimentación.

El enfoque resistivo permitió explorar la relación directa entre la geometría de las pistas conductoras y la variabilidad de la resistencia eléctrica ante estímulos ambientales, lo cual abre posibilidades para su uso en sistemas de monitoreo ambiental, caracterización de materiales y detección de gases. Por su parte, el diseño capacitivo, basado en electrodos interdigitados, evidenció una alta sensibilidad ante cambios en la humedad y la permitividad dieléctrica, lo que lo posiciona como una solución viable para aplicaciones en microfluídica, biomedicina y análisis de medios líquidos.

La utilización de herramientas digitales como KLayout y KiCad permitió una transición eficiente entre el diseño conceptual y la representación física, garantizando precisión geométrica y compatibilidad con procesos de microfabricación estándar. La verificación mediante Design Rule Check (DRC) aseguró la integridad estructural de los diseños, mientras que la validación de simetría y repetibilidad fortaleció la confiabilidad de los dispositivos en contextos experimentales.

Asimismo, la metodología adoptada se alineó con principios de eficiencia técnica y económica, al limitar la complejidad de las estructuras y optimizar el uso del sustrato de silicio. Se respetó el uso del Sistema Internacional de Unidades (SI) como referencia principal en todas las etapas del diseño y análisis, garantizando coherencia técnica y facilitando la comunicación científica. En los casos donde se recurrió a unidades no pertenecientes al SI por razones técnicas (como mils o pulgadas), se especificó su uso y equivalencia para evitar ambigüedades.

En conjunto, este trabajo establece una plataforma metodológica robusta de diseño y validación computacional para microchips. El diseño verificado, compatible con procesos de fabricación accesibles, representa la fase crítica previa a la experimentación. Su potencial de integración en sistemas inteligentes se validará en el futuro, una vez que el proyecto logre adquirir la infraestructura necesaria para el encapsulado y la caracterización eléctrica bajo condiciones operativas. Finalmente, se destaca la importancia de fomentar la formación académica en herramientas de diseño electrónico libre como estrategia para fortalecer las capacidades tecnológicas del país.

REFERENCIAS

Cirstea, M., Benkrid, K., Dinu, A., Ghiriti, R., & Petreus, D. (2024). Digital electronic system-on-chip design: Methodologies, tools, evolution, and trends. Micromachines, 15(2), 247. https://doi.org/10.3390/mi15020247

Medina, A. R., & Ullauri, S. A. (2025). Geopolítica de la guerra de semiconductores entre Estados Unidos y China: rivalidad tecnológica y poder global. Revista de Ciencias Sociales, (Número Especial 11), 35–46.

Lapizco-Encinas, B. H. (2008). Microfluidics: lab-on-a-chip microarrays. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 7(3), 295–306. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432008000300004

Medina-Vázquez, J. I., Ortiz-López, M. G., López-Juárez, R., & Montero-Vargas, M. (2019). Metodología de bajo costo para implementar circuitos electrónicos integrados con enfoque académico. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 18(3), 857–865. https://doi.org/10.24275/rmiq/IC770

Medrano, Serra, & Soto. (2017). KiCad, Herramienta de Software Libre de Modelado de Circuitos Impresos para el Desarrollo de Hardware. Ciencia e Ingeniería. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507555007010

Piñeres Espitia, H., & Mejía Neira, H. (2013). Plataformas tecnológicas aplicadas al monitoreo climático. Tecnura, 17(36), 143–156. https://doi.org/10.14483/udistrital.ponencia.201

Platero Dueñas, J. (2023). Desarrollo de dispositivos microfluídicos mediante impresión 3D para aplicaciones en biomedicina. Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/74674/

Wang, P., Xu, S., Shi, X., Zhu, J., Xiong, H., & Wen, H. (2025). Recent advances in resistive gas sensors: Fundamentals, material and device design, and intelligent applications. Chemosensors, 13(7), 224. https://doi.org/10.3390/chemosensors13070224

Zeng, Y., & Zeng, L. (2025). Capacitive flexible humidity sensor based on GOQD/CNC composites. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 36, 108. https://doi.org/10.1007/s10854-024-14143-6

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Comparative Evaluation of Four Digital Techniques for Complex Impedance Estimation in Electrical Impedance Spectroscopy

J. Villaseñor*. M. Gutierrez. J. Gutierrez***. A. Mendez****. E. Archundia*****

**Electronics Engineering Department, Technological Institute of Morelia, Morelia, Mexico*
(e-mail: villbar.juan@gmail.com, marcos.gl@morelia.tecnm.mx, jose.gg3@morelia.tecnm.mx, arturo.mp@morelia.tecnm.mx, enrique.ra@morelia.tecnm.mx).

Abstract: Electrical Bioimpedance Spectroscopy (BIS) relies on accurate estimation of magnitude and phase over broad frequency ranges and under noisy conditions. This work presents a comparative study of four digital demodulation algorithms: Time Stamp, In-Phase/Quadrature (I/Q), Fast Fourier Transform (FFT), and Hilbert transform, evaluated through MATLAB simulations and validated with hardware implementation on a microcontroller. A frequency sweep from 1 kHz to 1 MHz was performed on a 2R1C electric circuit model for biological tissue excited with 1 mA_{p-p}, with additive white Gaussian noise adjusted to SNR levels between 15 dB and 90 dB. Results show that FFT and I/Q achieve highest accuracy, reaching Root Mean Square Error (RMSE) below 0.2% in magnitude and 0.2° in phase for SNR ≥ 40dB. TS yields acceptable accuracy but exhibits frequency-dependent variations up to 1% RMSE in magnitude and 0.4° in phase. The Hilbert method provides consistent impedance estimates but is more sensitive to noise, with phase errors exceeding 2°. Experimental validations using a custom STM32F722ZE-based platform with a $500mA_{p-p}$ Howland Current Source corroborate the simulation trends. These results highlight FFT and I/Q as the most reliable demodulation strategies for high accuracy BIS applications, while TS and Hilbert remain suitable alternatives in resource-constrained implementations.

Keywords: Electrical Bioimpedance Spectroscopy, Digital demodulation, I/Q, FFT, Time stamp, Hilbert transform.

1. INTRODUCTION

Electrical Bioimpedance Spectroscopy (BIS) is a cost-efficient technique for characterizing the electrical and dielectric properties of biological tissues (Zhong *et al.*, 2024). It exploits the fact that tissue impedance is both frequency-dependent and sensitive to physiological state, providing valuable information for diagnostic and monitoring applications (Abasi *et al.*, 2022). Reported cases include heart monitoring(Scagliusi *et al.*, 2023; Kovács *et al.*, 2025), fruit and vegetables state (Hamed *et al.*, 2024; Kluza *et al.*, 2025), biosensing (Lyons-Reid *et al.*, 2021; Rae, Rand and Ward, 2024), and early-stage cancer detection (Baghbani *et al.*, 2021), (Ward *et al.*, 2024). Despite its many advantages, bioimpedance also faces limitations. The authors (Shah *et al.*, 2023) states that the impedance response of biological tissue lacks biomolecular and compositional specificity. Consequently, accurate quantitative interpretation requires reference measurements and advanced mathematical models. Moreover, as the technique relies on electrode contact, factors such as electrode-tissue interface stability, contact impedance, electrode size, and density can affect measurement accuracy, spatial resolution, and temporal performance. These challenges remain under active research, engineering development, and clinical validation.

From an instrumentation standpoint, BIS systems inject a known alternating current into the tissue and record the resulting voltage (Figure 1a). By extracting the magnitude and phase of the response, the tissue's complex impedance can be derived. This process, referred to as demodulation (Figure 1c), constitutes the core of BIS instrumentation and strongly constrains the design of subsequent system blocks (Wu *et al.*, 2020). It is common practice to analyze impedance measurements by modeling them with an equivalent electrical circuit that provides the best fit to the measured frequency-dependent real and imaginary components (Figure 1b). Such circuits are typically composed of resistors, capacitors, and inductors arranged in series, parallel, or mixed configurations, each associated with a characteristic time constant (Abasi *et al.*, 2022).

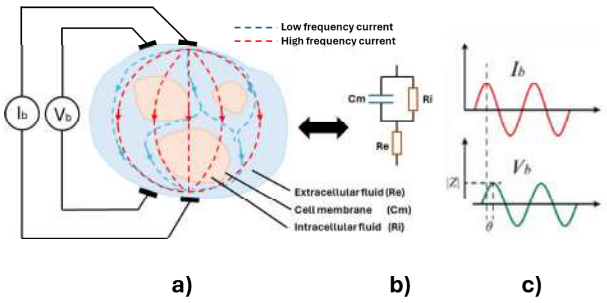


Figure 1. a) implementation of a four-electrode (tetrapolar), where current injection electrodes are used to create a signal, and a voltage sensing electrodes monitor the resultant signal. b) Equivalent circuit analysis is used to model and extract physiologically or compositionally relevant information from measured bioimpedance data, with resistive and capacitive elements associated with the cell membrane and intracellular fluid (Cm and Ri) and extracellular fluid (Re). c) Fundamental approach

to BIS measurements uses current injections via low amplitude sine wave and the measurement of resultant voltage to yield the impedance (Z).

Among demodulation strategies, synchronous in-phase/quadrature (I/Q) detection is one of the most established and widely adopted, both in experimental research and commercial medical devices (Cheon *et al.*, 2024). In I/Q detection, the measured signal is multiplied by two sinusoidal references: one in-phase and one shifted by 90° relative to the excitation current. Low-pass filtering yields the DC in-phase (I) and quadrature (Q) components, from which magnitude and phase are derived (Allegri *et al.*, 2018). Two main implementation paths exist: (i) analog I/Q (Wu *et al.*, 2021; Ben Atitallah *et al.*, 2022; Nwokoye and Triantis, 2024), where generation, multiplication, and filtering occur in hardware and only the I/Q Direct Current (DC) voltages are digitized, and (ii) digital I/Q (Conselvan De Oliveira et al., 2015; Allegri et al., 2018; Takhti and Odame, 2019; Fahimi Hanzaee et al., 2022; Rezaee-Dehsorkh et al., 2022), where the raw signal is digitized first and subsequent digital signal processing is carried out by an algorithm. Analog I/Q is fast and hardware-efficient but often requires high-order low-pass filters and high-speed ADCs to achieve adequate SNR and linearity, leading to higher cost and power consumption. The digital I/Q approach, while offering great flexibility, places considerable demands on the sampling rate, word length and computational efficiency.

Several variants and optimizations have been proposed to mitigate these challenges. For instance, excitation signals other than pure sinusoids such as square waves (Subhan and Ha, 2018) or pseudo-sinusoidal signals(Wu *et al.*, 2021). However, their significant harmonic content introduces distortion, spectral leakage, and nonlinear error terms(Subhan and Ha, 2019). Suppression of these artifacts remains an open problem, often requiring either advanced filtering or algorithmic harmonic rejection techniques.

Beyond I/Q detection, the literature describes alternative demodulation strategies. Zero-crossing and peak-detection approaches estimate phase via timing circuits or digital counters, while magnitude is translated into a DC level for ADC acquisition (Wu *et al.*, 2021). These circuits are attractive for their simplicity but are sensitive to jitter, noise, and waveform distortion. Time-to-digital conversion (TDC) methods extend this principle, mapping phase delays into digital timing intervals (Wu *et al.*, 2020; Salarabedi *et al.*, 2023).

More advanced digital approaches include spectral methods, notably Fast Fourier Transform (FFT) analysis (Wang *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2023; Kanoun and Kallel, 2024), which estimate impedance by resolving the fundamental excitation frequency component within the sampled spectrum. While FFT methods offer excellent frequency selectivity and robustness to noise, they introduce trade-offs between resolution, latency, and computational load, especially in embedded platforms (Kallel, Bouchaala and Kanoun, 2021). Similarly, the Hilbert transform–based analytic signal method derives magnitude and phase by constructing a complex envelope of the measured waveform. This approach avoids explicit reference multiplication but requires finite impulse response (FIR) filtering with sufficiently high order, which again impacts processing resources (Ibrahim, Hall and Jafari, 2017; Kuljic *et al.*, 2024).

From a system-level perspective, the choice of demodulation method has broad implications: it influences energy consumption, linearity, noise immunity, spectral selectivity, calibration complexity, and hardware requirements (Wu *et al.*, 2021; Ben Atitallah *et al.*, 2022; Cheon *et al.*, 2024). For example, wearable or portable BIS systems prioritize low-power architecture and minimal hardware overhead, often favoring simplified digital or hybrid techniques. In contrast, clinical and laboratory BIS platforms may tolerate greater hardware complexity to achieve higher accuracy, wider bandwidth, and better reproducibility.

Despite decades of progress, persistent challenges remain. Biological tissues are dispersive and heterogeneous, meaning impedance spectra vary significantly with frequency and between subjects. This complicates both calibration and repeatability across systems. Additionally, hardware nonidealities such as ADC quantization noise, clock jitter, thermal drift, and parasitic coupling limit attainable accuracy. These considerations reinforce the importance of digital demodulation pipelines capable of dynamic calibration, parameter adaptation via firmware, and algorithmic noise suppression. Such pipelines also facilitate systematic evaluation of algorithms under homogeneous conditions, which is critical for reproducibility and benchmarking.

In this article, we present a systematic comparison of digital demodulation algorithms for BIS, specifically:

1. Digital I/Q detection (reference-based synchronous demodulation),
2. FFT-based spectral analysis,
3. Hilbert transform–based analytic signal extraction, and
4. Time-stamp (TS) methods, which estimate phase from zero-crossing timing statistics combined with magnitude envelope detection.

All methods are evaluated under a unified protocol of excitation signals, windowing strategies, and error metrics. Performance is analyzed in terms of magnitude and phase accuracy, dynamic range, bandwidth, computational complexity, and robustness to noise, providing a fair comparative framework to guide future BIS system design.

1.1 Overview

In BIS, impedance is derived from measurements of the injected current (I) and resulting voltage (V) across the tissue. According to Ohm's law:

$$Z = \frac{V}{I} \tag{1}$$

The complex impedance, denoted as Z, can be expressed in polar form as:

$$Z = Ae^{j\theta} = R + jX \tag{2}$$

Where A is the magnitude and θ is the phase shift between current and voltage. The goal of demodulation algorithm is therefore to estimate A and θ accurately under practical noise, bandwidth, and hardware non-idealities.

1.2 Digital Time-Stamp demodulation

The time Stamp (TS) method extracts phase and magnitude by converting crossing events into temporal intervals (Figure 2).

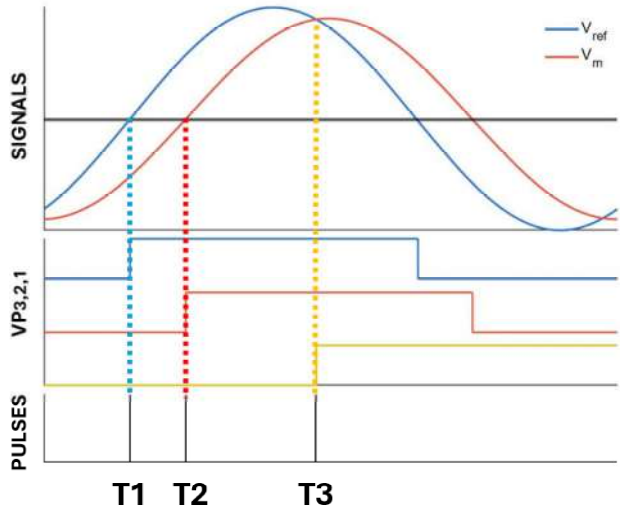


Figure 2 Time Stamp concept, waveform and pulse in the time domain.

The time Stamp demodulation method use three zero-crossing points of voltage V_{ref} and V_m (T1 and T2) and their intersection point (T3) (Wu *et al.*, 2020). Zero-crossing of the reference (V_{ref}) and the measured signal (V_m) at instants T_1 and T_2 define the phase delay:

$$\theta = 2\pi f(T_2 - T_1) \tag{3}$$

Amplitude is estimated using a third time stamp (T_3) at the intersection of V_{ref} and V_m:

$$V_{ref}(T_3) = A_{ref}\,[\sin(2\pi f(T_3 - T_1)] \tag{4}$$

$$A_m = \frac{V_{ref}(T_3)}{\sin[2\pi f(T_3 - T_2)]} \tag{5}$$

Classically, only three comparators are required in the analog front-end, while counters in the digital domain perform the arithmetic. This minimizes hardware complexity and power consumption, but accuracy is sensitive to jitter, time resolution, and noise. Fully digital implementations avoid comparators altogether, reduce analog complexity at the expense of processing load and high-speed ADCs.

1.3 I/Q demodulation

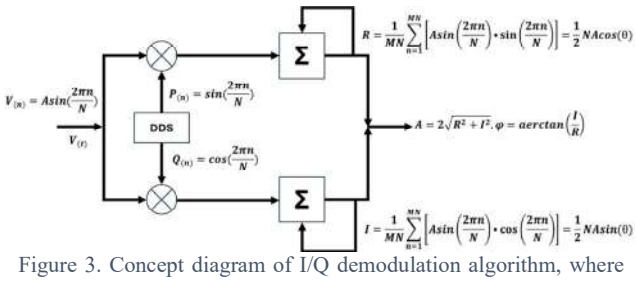


Figure 3. Concept diagram of I/Q demodulation algorithm, where V(t) (input) is multiplied by in phase and quadrature signals generated by a DDS and filtered by digital or analogic components.

I/Q demodulation relies on sinusoidal excitation. As illustrated in Figure 3, a sinusoidal input voltage (6)

$$V_I = V_i \sin(\omega t) \tag{6}$$

Where V_i is the voltage amplitude and **ω**= 2πf the angular frequency, drives a voltage-controlled current source with transconductance G_m. The resulting current is:

$$I_{in}(t) = G_m V_{in}(t) = I_i \sin(\omega t) \tag{7}$$

This current is injected into the tissue through a pair of electrodes $Z_{e1,e2}$. The voltage measured at the output of the front-end is:

$$V_o(t) = A_m Z_t I_i \sin(\omega t - \theta) \tag{8}$$

Where A_v is the amplifier gain, Z_t the tissue impedance, and θ the phase delay between the injected current and the measured voltage. The input reference is used to generate two demodulation signals: one in phase with the excitation signal (6) and one in quadrature (90° shifted):

$$V_Q = V_i \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \tag{9}$$

Both references are multiplied by the measured output voltage $V_o(t)$.

For the in-phase channel:

$$V_1 = V_o \times V_I = A_v Z_t I_i \sin(\omega t - \theta) \times V_i \sin(\omega t) \tag{10}$$

$$V_1 = \frac{A_v Z_t I_i V_i}{2}\left[\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - \cos(2\omega t + \theta)\right] \tag{11}$$

For the quadrature channel:

$$V_2 = V_o \times V_Q = A_v Z_t I_i \sin(\omega t - \theta) \times V_i \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \tag{12}$$

$$V_2 = \frac{A_v Z_t I_i V_i}{2}\left[\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - \cos\left(2\omega t - \theta + \frac{\pi}{2}\right)\right] \tag{13}$$

Each product is then passed through a low-pass filter to remove the double frequency components, leaving two DC terms:

$$I_{demo} = \frac{A_v Z_t I_i V_i}{2}\cos(\theta) \tag{14}$$

$$Q_{demo} = \frac{A_v Z_t I_i V_i}{2}\sin(\theta) \tag{15}$$

By normalizing equations (14) and (15) with respect to the scaling factor $\frac{A_v Z_t I_i V_i}{2}$, both the magnitude and phase of the measured voltage can be recovered, providing direct access to the real and imaginary components of the tissue impedance Z_t.

1.4 FFT demodulation

FFT is a widely used technique for extracting the spectral components of a signal, and in BIS it serves as a robust method to estimate amplitude and phase. Since bioimpedance systems typically operate with sinusoidal excitation at known frequencies, the FFT can isolate the frequency component from the sampled voltage and current signals, thereby allowing precise computational of the complex impedance.

For N samples acquired at a sample frequency F_s. The discrete Fourier transform (DFT) of a signal x(n) at frequency index k (corresponding to f=kF_s/N) is:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi nk/N} \quad (16)$$

Which separates into real and imaginary components:

$$X[k] = X_{real}[k] + jX_{imag}[k] \quad (17)$$

Where j is the imaginary unit.
By selecting the frequency bin that matches the excitation, the magnitude and phase of both voltage and current signals are obtained. The impedance phase can be calculated as:

$$\theta = \theta_{voltage} - \theta_{current} \quad (18)$$

Or equivalently:

$$\theta = tan^{-1}\left(\frac{V_{img}}{Vreal}\right) - tan^{-1}\left(\frac{I_{img}}{I_{real}}\right) \quad (19)$$

Where (V_{real}, V_{imag}) and (I_{real}, I_{imag}) are the FFT components of voltage and current, respectively. The ratio of their magnitude yields |Z|, where |Z| is given by:

$$|Z| = \frac{|V[k]|}{|I[k]|} \quad (20)$$

However, several practical considerations must be addressed. The FFT assumes periodicity within the analysis window; if the sampling is not coherent with the excitement, spectral leakage occurs, necessitating the use of windowing functions (e.g., Hamming, Blackman). Increasing the number of samples N improves frequency resolution but also raises computational cost and acquisition time, which can be prohibitive in real-time, low-power BIS devices. Memory requirements and ADC resolution further constrain embedded implementations, making FFT methods more suitable for research prototypes, laboratory-grade BIS equipment, or FPGA/DSP-based systems.

1.5 Analytic signal demodulation

The Hilbert transform is a signal analysis tool that enables the construction of a complex-valued signal associated with a real waveform x(t). The resulting complex signal, called the analytic signal, facilitates the instantaneous estimation of amplitude and phase.

The Hilbert transform of a real signal is defined as:

$$\hat{x}(t) = H\{x(t)\} = \frac{1}{\pi}(p.v)\int_{-\infty}^{\infty}\frac{x(\tau)}{t-\tau}d\tau \quad (21)$$

Where p.v denotes the Cauchy principal value.
The analytic signal is then constructed as:

$$x_a(t) = x(t) + j\cdot\hat{x}(t) \quad (22)$$

From this representation, the instantaneous amplitude and phase are obtained as:

$$x_a(t) = \sqrt{x(t)^2 + \hat{x}(t)^2} \quad (23)$$

$$\theta = tan^{-1}\left(\frac{\hat{x}(t)}{x(t)}\right) \quad (24)$$

In digital systems, the Hilbert transforms implemented as a linear-phase, odd-symmetric finite impulse response (FIR) filter. The discrete form of the analytic signal is:

$$x_a(n) = x(n) + j * \hat{x}(n) \quad (25)$$

With:

$$\hat{x}(n) = x(b) * h[n] \quad (26)$$

Where h[n] are the FIR filter coefficients approximating the ideal Hilbert response:

$$h[n] = \begin{cases} \frac{2}{\pi n}, & n\ impar \\ 0, & n\ par \end{cases} \quad para\ n = -\frac{N-1}{2}, \ldots, \frac{N-1}{2} \quad (27)$$

in BIS, Hilbert demodulation enables extraction of both magnitude and phase of the measured voltage and current without requiring explicit reference signals.
However, its limitations include the need for long FIR filters to approximate the ideal Hilbert response accurately, which increases computational load, memory usage, and latency. As a result, Hilbert demodulation is most suitable for offline processing or DSP/FPGA-based implementations, rather than resource-constrained embedded BIS devices.

2. SIMULATION AND EVALUATION

The accuracy of demodulation methods can be affected by several nonlinear factors present in the signal, among which additive noise is particularly relevant. To evaluate the behavior of different algorithms under varying noise intensities and frequencies, a simulation model was developed in MATLAB. This model allows assessing the impact of noise and excitation frequency on system performance by comparing theoretical impedance values with those obtained through demodulation in terms of magnitude and phase.

The simulation implemented a frequency sweep of the excitation signal from 1 kHz to 1 MHz, covering the spectral range typically required in bioimpedance applications. The injected current had an amplitude of $1mA_{p-p}$ and was applied to a load circuit consisting of a 1.47 kΩ resistor in parallel with a 104nF capacitor, connected in series with an additional 814 Ω resistor. The resulting voltage across the load was stored and subsequently processed using the four demodulation approaches.

To investigate the robustness of the algorithm, both the signal V_{ref} and the measured signal V_m were corrupted with additive white Gaussian noise, adjusted to a signal-to-noise ratio (SNR) of 40dB. The simulation was repeated for 100 iterations, and the results were averaged over three cycles of the excitation signal to obtain stable estimates of magnitude and phase.

2.1 RMSE of magnitude and phase vs SNR

Figure 4 shows the Root Mean Square Error (RMSE) of impedance magnitude versus SNR for the four digital demodulation methods. For each SNR point, estimates were computed over a 1 kz-1 MHz sweep and summarized by a global RMSE. As expected, the error decreases monotonically with SNR across all methods. At low SNR (15dB). Performance spreads out: Hilbert exhibits the largest RMSE, TS follows with intermediate error, while I/Q and FFT remain clearly lower. When SNR ≥ 30dB, the curves converge and approach a noise floor set by algorithmic/implementation limits, I/Q attains the smallest residual error, FFT is close behind, Hilbert stabilizes slightly higher, and TS shows the highest asymptote.

Overall, optimum magnitude accuracy is obtained at high SNR (45-60dB), reaching sub-percent. The Hilbert method is more sensitive to additive noise in this setup, particularly at low SNR, whereas TS scheme retains the largest residual due to its timing-based estimation. These trends are consistent with the expected noise-robustness hierarchy of the methods and validate the choice of I/Q and FFT for high-accuracy BIS measurements under practical SNR conditions

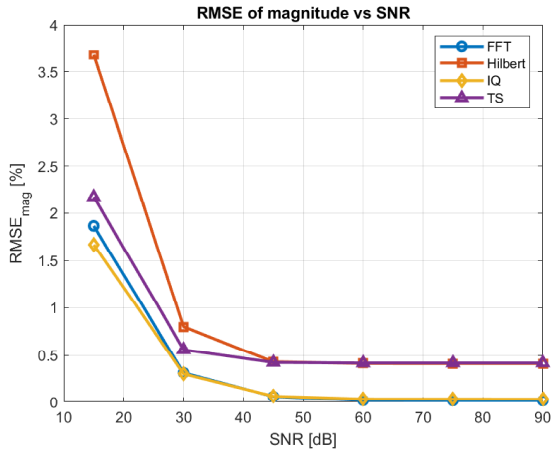


Figure 4. Simulated RMSE of magnitude of the four methods at 1 kHz to 1 MHz with output of 1 mA_{p-p}. at 15dB, 30dB, 45dB, 60dB, 75dB and 90dB.

Figure 5 presents the RMSE of phase estimation versus SNR. The trends mirror those of magnitude error, with performance improving steadily as the SNR increases. At low SNR, dispersion between methods is evident: the Hilbert approach exhibits the largest phase error, exceeding 2°, followed by TS with errors around 1.3°. in contrast, I/Q and FFT demonstrate substantially better accuracy, maintaining errors below 1° even in the low-SNR regime.

For SNR ≥ 30dB, the phase errors converge, approaching residual floors below 0.2° for FFT and I/Q, while TS stabilizes around 0.4°, and Hilbert remains slightly higher.

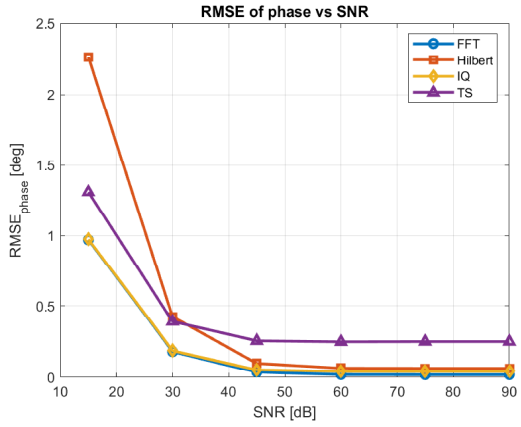


Figure 5. Simulated RMSE of phase of the four methods at 200 kHz with output of 1 mA_{p-p}. at 15dB, 30dB, 45dB, 60dB, 75dB and 90dB.

Tables 1 and 2 present the numerical RMSE values of magnitude and phase obtained for different SNR levels ranging from 15 dB to 90 dB. These results condense the behavior observed, these results confirm that FFT and I/Q demodulation are the most robust methods against noise in both magnitude and phase. The TS algorithm achieves acceptable accuracy but retains higher baseline error due to its timing-based estimation, while the Hilbert transform is consistently more sensitive to noise.

Table 1. Summary of RMSE results across SNR conditions for magnitude.

RMSE de magnitud						
	SNR15dB	SNR30dB	SNR45dB	SNR60dB	SNR75dB	SNR90dB
FFT	1.8672	0.31268	0.059625	0.017922	0.015796	0.015619
Hilbert	3.6802	0.7998	0.42996	0.41179	0.41055	0.41085
IQ	1.6702	0.30146	0.062641	0.032667	0.031701	0.031495
TS	2.1737	0.55877	0.42301	0.41703	0.41743	0.41734

Table 2. Summary of RMSE results across SNR conditions for phase.

RMSE de fase						
	SNR15dB	SNR30dB	SNR45dB	SNR60dB	SNR75dB	SNR90dB
FFT	0.96918	0.18135	0.037816	0.020449	0.019668	0.019661
Hilbert	2.2656	0.42369	0.099778	0.066186	0.065168	0.065102
IQ	0.97255	0.18748	0.054224	0.042671	0.042309	0.042326
TS	1.3079	0.39064	0.25638	0.24942	0.25095	0.251

2.2 RMSE versus frequency

Figures 6 and 7 show the RMSE of phase and magnitude estimation as a function of frequency for the four methods. These results illustrate how accuracy varies across the full sweeper under fixed SNR conditions of 40dB.

For phase accuracy (Figure 5), The FFT method consistently achieves the lowest error, remaining below 0.1° across most of the spectrum. The I/Q method follows closely, with errors below 0.15°. The Hilbert approach exhibits larger errors, around 0.15-0.2° on average, while TS algorithm shows the highest sensitivity to frequency, with peaks exceeding 0.45° around the mid-frequency region. These results indicate that phase errors in TS are frequency-dependent, likely due to timing jitter and interpolations limitations, whereas FFT and I/Q remain more robust.

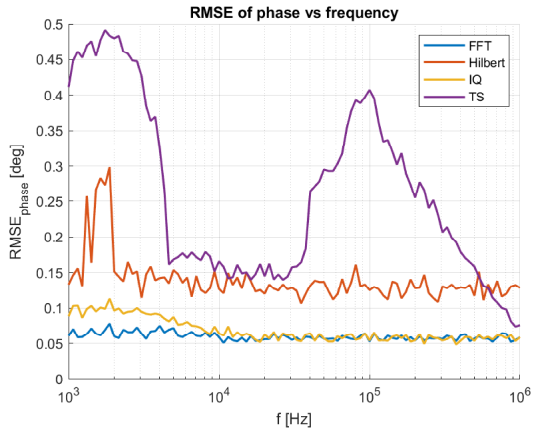


Figure 6. Simulated RMSE of phase of the four methods at 1 kHz to 1 MHz with output of 1 mA_{p-p}. at 40dB.

For magnitude accuracy (Figure 7), the FFT and I/Q again provide the best performance, with RMSE values consistently below 0.2%. The Hilbert method shows intermediate errors around 0.2-0.3%, but with noticeable spikes at specific frequencies, reflecting sensitivity to finite-sample effects. The TS method displays higher error levels in the central frequency band, reaching 1% RMSE, though its performance improves at higher frequencies.

These frequency-domain analyses confirm the superior stability of FFT and I/Q, across the spectrum, while Hilbert and TS approaches are more frequency-sensitive, with TS particularly affected at mid-band. This behavior highlights the trade-off between algorithmic simplicity and robustness when selecting demodulation methods for broadband impedance spectroscopy.

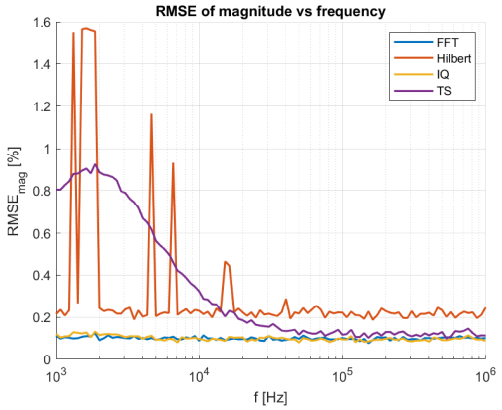


Figure 7. Simulated RMSE of magnitude of the four methods at 1 kHz to 1 MHz with output of 1 mA_{p-p}. at 40dB.

2.3 Validation with 2R1C model

Figure 8-11 shown Nyquist plots of the estimated impedance compared with the theoretical 2R1C model (Figure 1b) with conditions of I_{p-p}= 1 mA and SNR of 40dB. In all cases, the estimated traces (circles) closely overlap the theoretical curve (black line), indicating minimal systematic distortion across the 1 kHz – 1 MHz frequency sweep. Minor deviations appear only at the frequency extremes.

The Nyquist plot of the TS method (Figure 8) reveals visible deviations from the theoretical semicircle at both low and high frequencies. This is consistent with the Figure 5 results, where TS showed higher RMSE in magnitude and phase outside the mid-band. The zero-crossing strategy, while simple in hardware, introduces accumulated timing errors that degrade accuracy.

For the I/Q method, the estimated impedance closely follows the theoretical curve across the frequency range (Figure 9). The method preserved stable accuracy except for minor variations at extreme frequencies. The averaging of quadrature products reduces noise sensitivity, which is reflected as a smooth and consistent semicircular trajectory in the Nyquist plane.

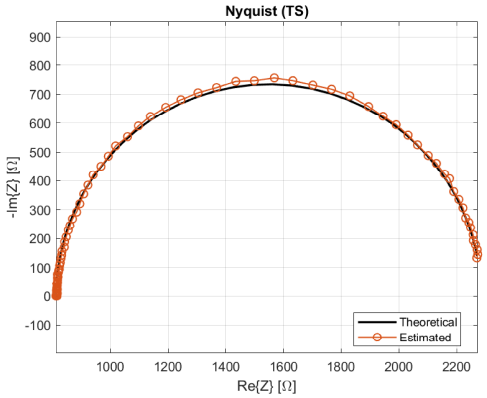


Figure 8. Simulated Nyquist response using the TS method. Comparison between theoretical impedance and estimated values obtained from simulation. The Nyquist plot illustrates the accuracy of the method across the frequency sweep.

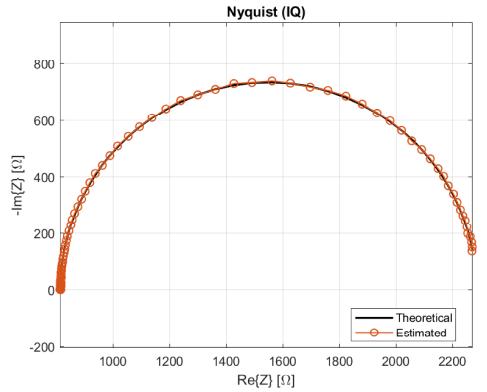


Figure 9. Simulated Nyquist response using the I/Q method. Comparison between theoretical impedance and estimated values obtained from simulation. The Nyquist plot illustrates the accuracy of the method across the frequency sweep.

The Hilbert method exhibits distinctive behavior (Figure 10): although the overall semicircular trajectory of the 2R1C model is preserved, the estimated locus presents irregular oscillations and dispersion across the entire frequency range. This can be interpreted as a form of "stable instability": the method does not diverge or collapse, but introduces systematic fluctuations that remains present at low, mid, and high frequencies. Such behavior stems from the discrete FIR implementation of the Hilbert transform, which is prone to edge effects and finite-length artifacts, as well as from sensitivity to noise on cycle-to-cycle basis.

FFT provides the cleanest match to the theoretical semicircle (Figure 11), with estimated points virtually indistinguishable from the reference. This corroborates Figures 5 and 6, where FFT maintained the lowest error across the entire band. Its ability to concentrate energy into coherent frequency bins ensures accurate extraction of both magnitude and phase, making it the benchmark method despite its heavier computational cost.

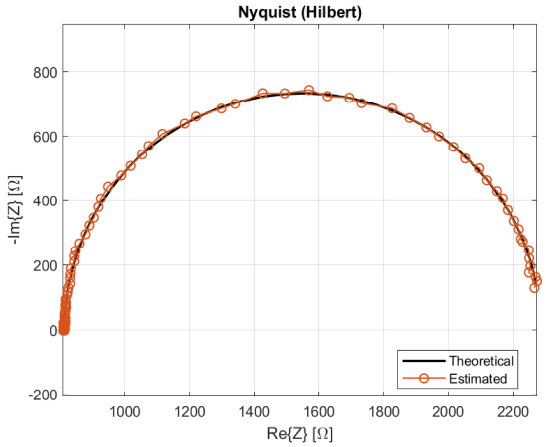


Figure 10. Simulated Nyquist response using the Hilbert method. Comparison between theoretical impedance and estimated values obtained from simulation. The Nyquist plot illustrates the accuracy of the method across the frequency sweep.

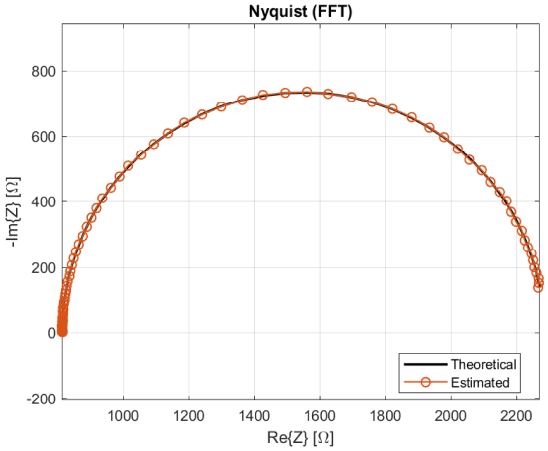


Figure 11. Simulated Nyquist response using the FFT method. Comparison between theoretical impedance and estimated values obtained from simulation. The Nyquist plot illustrates the accuracy of the method across the frequency sweep.

3. SYSTEM IMPLEMENTATION

A dedicated hardware platform was developed to evaluate the performance of digital demodulation methods under controlled bioimpedance conditions. The system is divided into three functional blocks: i) the excitation stage, which generates a sinusoidal current using a modified Howland current source (HCS), and ii) the impedance readout stage, and iii) the digital control, acquisition, and processing stage as shown in Figure 12.

The excitation block employs a modified Howland current source implemented with a high-speed operational amplifier. This topology was selected due to its ability to provide accurate, bidirectional current drive with high impedance output. The input sinusoidal voltage is generated externally and conditioned by an AD9833 Direct Digital Synthesizer (DDS), with frequency and amplitude control provided via SPI communication. A digitally programmable potentiometer MCP41010 allows software-controlled adjustment of the voltage amplitude. The feedback network of the HCS defines the transconductance gain, while resistor matching ensures the current amplitude. A buffer stage isolates the generator and maintains signal integrity before injection into the load. For this work, the excitation current was set to 0.5 mA_{p-p} in accordance with safety levels for bioimpedance spectroscopy.

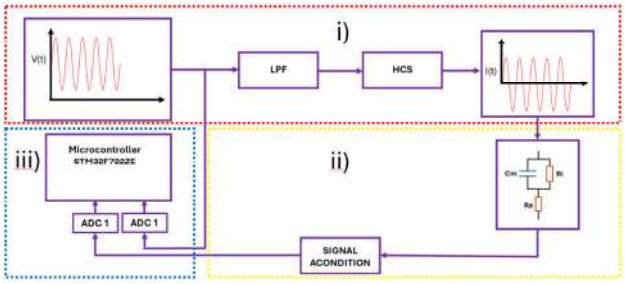


Figure 12.Experimental setup based on an STM32F722ZE microcontroller. The system integrates a DDS, an HCS, and a 2R1C equivalent circuit as the load. Dual ADC channels acquire reference and measurement signals. The signal processing block condition the resultant.

The voltage response across the load is sensed using a low-noise high-speed instrumentation amplifier configured for fully differential input. This stage provides high common-mode rejection and stable gain, essential to suppress artifacts caused by electrode mismatch and parasitic capacitances.

The central control of the system is performed by an STM32F722ZE microcontroller. This device configures and drives the AD9833 DDS though an SPI interface. The conditioned analog signals from the readout stage are acquired via the microcontroller's ADC, due to hardware limitations related to the acquisition stage, the excitation frequency range was restricted to 1 kHz- 100 kHz. The ADC samples the signal at 10 samples per cycle for three consecutive cycles, resulting in a total array of 30 samples that are then digitally processed. The microcontroller implements all four demodulation algorithms on this data, enabling a direct comparison under identical conditions.

5. MEASURED RESULTS

Four demodulation techniques were used to reconstruct the experimental data from the measured peak voltages and phase angles. A single excitation current, estimated from the high-frequency plateau, was used for all methods. The results are compared against the theoretical 2R1C equivalent circuit. All methods reproduce the expected response (Figure 13), with the magnitude decreasing from the low-frequency impedance dominated by the parallel branch to the high-frequency resistive plateau, and the phase evolving from capacitive to nearly resistive behavior.

In the magnitude Bode diagram, the TS method exhibited noticeable instability when estimating impedance in noisy environments, showing higher deviations from theoretical values. This behavior can be attributed to a limited sample density and the increased sensitivity of the TS approach to noise, which may require additional signal conditioning or more advanced processing strategies.

The phase Bode diagram demonstrates overall consistent performance across the frequency range. However, a relatively

constant offset is observed, which may originate from parasitic components in the active integrated circuits generating phase accumulation errors propagating through different processing stages.

It is also noteworthy that all methods present transient behavior at the lowest frequencies. This effect can be explained by factors such as finite acquisition time, residual settling of the excitation source. These phenomena increase the uncertainty in the estimation of impedance at low frequencies and highlight the need for careful design of both excitation waveform and the acquisition strategy.

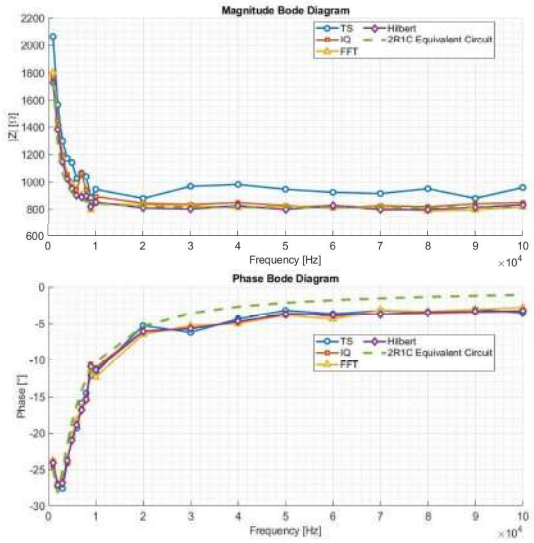


Figure 13. Bode magnitude (top) and phase (bottom) of the measured impedance (1 kHz-100 kHz).

The quantitative error graphics in Figure 14 highlights clear differences in the accuracy of the demodulation techniques. In terms of magnitude, the TS method presents the largest deviations, exceeding 20% at several frequencies, and shows high variability across the entire sweep. This confirms that TS is the least reliable approach under noisy or low sample conditions. In contrast, I/Q, FFT, and Hilbert maintain errors below ±5% in magnitude over most of the frequency range, with FFT consistently yielding the smallest deviations.

Regarding phase, all methods present a nearly constant offset of approximately -2° compared to 2R1C model. However, when considering phase dispersion, Hilbert shows the largest variability (1.96°), slightly higher than TS (1.87°), while I/Q and FFT provide the most stable behavior with the lowest dispersion of 1.86°.

Overall, FFT offers the best performance in both magnitude and phase, combining low error and stability. I/Q also demonstrates consistent and accurate results, while Hilbert, although accurate in magnitude, suffers from higher phase variability. TS, meanwhile, presents the poorest accuracy, particularly in magnitude estimation, and is more susceptible to noise and frequency-dependent artifacts.

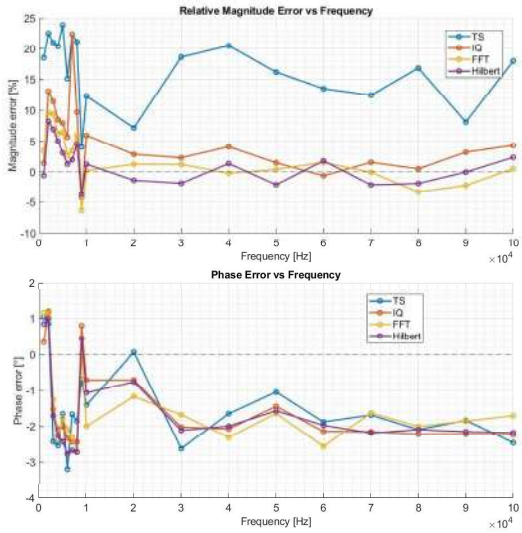


Figure 14. Relative magnitude and phase error with respect to the 2R1C Equivalent circuit across the frequency range 1 kHz-100 kHz.

6. DISCUSSION

Table 3 summarizes the quantitative errors analysis of the four demodulation techniques. The Table contrasts the performance of the evaluated methods in this work with values reported in previous studies, and it also specifies whether the implementation was realized using digital signal processing or analog circuitry.

In the present work, all methods exhibited limited accuracy in both magnitude and phase when compared to the 2R1C model, which can be attributed to the relatively low SNR of the measurement setup and the influence of parasitic components in the analog front-end.

The TS method, being a time-based algorithm, is highly sensitive to noise and sampling density. Its accuracy can be significantly improved with stronger digital signal processing. Nevertheless, TS demonstrates strong potential in phase estimation, achieving competitive performance compared with results reported in the literature-

On the other hand, FFT and Hilbert require higher sampling rates to achieve accurate spectral representation. Their performance can be enhanced by applying interpolation techniques, although at the cost of increased computational complexity.

The I/Q demodulation is particularly sensitive to quadrature mismatches in the acquisition chain. If these systematic errors and cumulative offsets in the active analog components are not carefully calibrated or digital compensated, the overall accuracy in both magnitude and phase deteriorates.

These findings suggest that there remain substantial room for improvement in all four digital methods. By incorporating advances digital signal processing strategies, such as adaptive calibration, noise reduction algorithms. The magnitude and phase accuracy can be increased at the expense of higher software complexity and processing requirements. This trade-

off is particularly relevant for portable or embedded bioimpedance systems, where computational resources and power consumption are critical design constraints-

Table 3. Comparison with other works

	Mag error (%)	Phase error (°)	Frequency range	Methodologic
TS (this work)	17.35	1.87	1 kHz-100 kHz	Digital
IQ (this work)	7.91	1.86	1 kHz-100 kHz	Digital
FFT (this work)	4.55	1.86	1 kHz-100 kHz	Digital
Hilbert (this work)	3.43	1.87	1 kHz-100 kHz	Digital
TS(Wu et al. 2020)	2.94	1.19	10 kHz- 500 kHz	Analog
IQ (Ben et al. 2022)	3.299	1.803	1 kHz- 1 MHz	Analog
FFT (wu et al. 2022)	1.64	0.75	1 kHz – 1 MHz	Digital

7. CONCLUSION

The comparative study of digital demodulation algorithms for BIS highlighted not only their strengths but also their inherent limitations. While FFT and Hilbert methods achieve the lowest RMSE values in both magnitude and phase, and TS and I/Q provided simpler alternatives, several practical limitations must be highlighted.

In real hardware implementation, I/Q detection suffers from quadrature mismatch and finite resolution in digital oscillators, which can introduce systematic phase errors not captured in the idealized simulations. FFT-based approaches are affected by spectral leakage, windowing artifacts, and quantization noise, especially when coherent sampling is not guaranteed. The Hilbert transform is limited by finite-length filters, edge effects, and cycle-to-cycle fluctuations, which manifest as irregular oscillations in experimental Nyquist plots. The Time Stamp method remains highly sensitive to jitter, low SNR, counter resolution, and low-density samples, factors that were only partially modeled in this study.

It is also important to note that many of these non-idealities such as ADC quantization noise, clock drift, electrode impedance variability, and parasitic couplings were not fully accounted for in the simulation environment, meaning that real world performance diverge from the reported RMSE values as shown in the Figure 13, where capacitive couplings from integrated circuits affect the real impedance of the 2R1C model and generates a phase error.

Although I/Q and FFT remain the most accurate demodulation methods for BIS, no single algorithm is universally optimal. The best choice depends on system-level requirements and real-world constraints.

REFERENCES

Abasi, S. *et al.* (2022) "Bioelectrical Impedance Spectroscopy for Monitoring Mammalian Cells and Tissues under Different Frequency Domains: A Review," *ACS Measurement Science Au*, 2(6), pp. 495–516. Available at: https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.2c00033.

Allegri, D. *et al.* (2018) "CMOS-Based Multifrequency Impedance Analyzer for Biomedical Applications," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 12(6), pp. 1301–1312. Available at: https://doi.org/10.1109/TBCAS.2018.2867172.

Ben Atitallah, B. *et al.* (2022) "Comparative Study of Measurement Methods for Embedded Bioimpedance Spectroscopy Systems," *Sensors*, 22(15). Available at: https://doi.org/10.3390/s22155801.

Baghbani, R. *et al.* (2021) "Bioimpedance Spectroscopy Measurement and Classification of Lung Tissue to Identify Pulmonary Nodules," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, pp. 1–7. Available at: https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3105241.

Cheon, S.-I. *et al.* (2024) "Impedance-Readout Integrated Circuits for Electrical Impedance Spectroscopy: Methodological Review," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 18(1), pp. 215–232. Available at: https://doi.org/10.1109/TBCAS.2023.3319212.

Conselvan De Oliveira, A. *et al.* (2015) "A Comparison between Direct Digital Measurement Technique and Digital Quadrature Demodulation for Complex Bioimpedance Measurement Implementation in FPGA." Available at: https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3500.5202.

Fahimi Hanzaee, F. *et al.* (2022) "A Low-Power Recursive I/Q Signal Generator and Current Driver for Bioimpedance Applications," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 69(10), pp. 4108–4112. Available at: https://doi.org/10.1109/TCSII.2022.3187076.

Hamed, S. *et al.* (2024) "Supervised classification and circuit parameter analysis of electrical bioimpedance spectroscopy data of water stress in tomato plants," *Computers and Electronics in Agriculture*, 226, p. 109347. Available at: https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109347.

Ibrahim, B., Hall, D.A. and Jafari, R. (2017) "Bio-impedance spectroscopy (BIS) measurement system for wearable devices," in *2017 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*. IEEE, pp. 1–4. Available at: https://doi.org/10.1109/BIOCAS.2017.8325138.

Kallel, A.Y., Bouchaala, D. and Kanoun, O. (2021) "Critical implementation issues of excitation signals for embedded wearable bioimpedance spectroscopy systems with limited resources," *Measurement*

Science and Technology, 32(8), p. 084011. Available at: https://doi.org/10.1088/1361-6501/abf78e.

Kanoun, O. and Kallel, A.Y. (2024) "High-performance efficient embedded systems for impedance spectroscopy: Challenges and potentials," *Electrochimica Acta*, 492. Available at: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144351.

Kluza, M. *et al.* (2025) "An Assessment of the Freshness of Fruits and Vegetables Through the Utilization of Bioimpedance Spectroscopy (BIS)—A Preliminary Study," *Foods*, 14(6), p. 947. Available at: https://doi.org/10.3390/foods14060947.

Kovács, F. *et al.* (2025) "Electrical bioimpedance spectroscopy as a tool for non-destructive monitoring nitrogen supply in two lettuce genotypes," *Scientia Horticulturae*, 349, p. 114229. Available at: https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114229.

Kuljic, B. *et al.* (2024) "An Effective and Robust Parameter Estimation Method in a Self-Developed, Ultra-Low Frequency Impedance Spectroscopy Technique for Large Impedances," *Electronics*, 13(16), p. 3300. Available at: https://doi.org/10.3390/electronics13163300.

Li, W. *et al.* (2023) "Bioimpedance spectroscopy measurement method based on multisine excitation and integer-period undersampling," *Measurement Science and Technology*, 34(11), p. 115701. Available at: https://doi.org/10.1088/1361-6501/ace7e7.

Lyons-Reid, J. *et al.* (2021) "The influence of body position on bioelectrical impedance spectroscopy measurements in young children," *Scientific Reports*, 11(1), p. 10346. Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-021-89568-8.

Nwokoye, I.I. and Triantis, I.F. (2024) "A Phase Error Correction System for Bioimpedance Measurement Circuits," *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(12). Available at: https://doi.org/10.3390/app14125202.

Rae, L.S., Rand, J.S. and Ward, L.C. (2024) "Measuring body composition in dogs using bioelectrical impedance spectroscopy," *The Veterinary Journal*, 304, p. 106067. Available at: https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2024.106067.

Rezaee-Dehsorkh, H. *et al.* (2022) "A Low-Power Single-Path Bio-Impedance Measurement System Using an Analog-to-Digital Converter for I/Q Demodulation," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 16(6), pp. 1129–1137. Available at: https://doi.org/10.1109/TBCAS.2022.3213869.

Salarabedi, H. *et al.* (2023) "A novel method for measuring body bioimpedance and its FPGA implementation," *Microprocessors and Microsystems*, 99. Available at: https://doi.org/10.1016/j.micpro.2023.104817.

Scagliusi, S.F. *et al.* (2023) "Bioimpedance Spectroscopy-Based Edema Supervision Wearable System for Noninvasive Monitoring of Heart Failure," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 72, pp. 1–8. Available at: https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3273662.

Shah, C. *et al.* (2023) "Bioimpedance spectroscopy for breast cancer-related lymphedema assessment: clinical practice guidelines," *Breast Cancer Research and Treatment*, 198(1), pp. 1–9. Available at: https://doi.org/10.1007/s10549-022-06850-7.

Subhan, S. and Ha, S. (2018) *Harmonic Error Cancellation for Accurate Square-wave-based Bio-Impedance Measurements*. Available at: https://doi.org/10.0/Linux-x86_64.

Subhan, S. and Ha, S. (2019) "A Harmonic Error Cancellation Method for Accurate Clock-Based Electrochemical Impedance Spectroscopy," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 13(4), pp. 710–724. Available at: https://doi.org/10.1109/TBCAS.2019.2923719.

Takhti, M. and Odame, K. (2019) "Structured Design Methodology to Achieve a High SNR Electrical Impedance Tomography," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 13(2), pp. 364–375. Available at: https://doi.org/10.1109/TBCAS.2019.2894157.

Wang, W. *et al.* (2017) "Design of a recursive single-bin DFT algorithm for sparse spectrum analysis," *Cluster Computing*, 20(2), pp. 1483–1492. Available at: https://doi.org/10.1007/s10586-017-0866-8.

Ward, L.C. *et al.* (2024) "Comparison of Volume Measurements and Bioimpedance Spectroscopy Using A Stand-on Device for Assessment of Unilateral Breast Cancer-Related Lymphedema," *European Journal of Breast Health*, 20(2), pp. 141–148. Available at: https://doi.org/10.4274/ejbh.galenos.2024.2023-12-8.

Wu, Y. *et al.* (2020) "Time Stamp-A Novel Time-to-Digital Demodulation Method for Bioimpedance Implant Applications," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 14(5), pp. 997–1007. Available at: https://doi.org/10.1109/TBCAS.2020.3012057.

Wu, Y. *et al.* (2021) "Electrical Impedance Tomography for Biomedical Applications: Circuits and Systems Review," *IEEE Open Journal of Circuits and Systems*, 2, pp. 380–397. Available at: https://doi.org/10.1109/OJCAS.2021.3075302.

Zhong, H. *et al.* (2024) "A General and Accurate Impedance Demodulation Method Based on Improved DFT for Electrical Impedance Spectrometer," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 20(10), pp. 11553–11564. Available at: https://doi.org/10.1109/TII.2024.3409436.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Real-Time STFT on STM32H7 for Surface EMG Analysis ⋆

M. Martínez Palomo * **IA. Melchor Uceda** *
JA. Gutiérrez Gnecchi ** **M. Gutiérrez López** **
JC. Olivares Rojas **

* *División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Morelia. (M19120128@morelia.tecnm.mx,D14092045@morelia.tecnm.mx)*
** *División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Morelia. (jose.gg3@morelia.tecnm.mx, marcos.gl@morelia.tecnm.mx, juan.or@morelia.tecnm.mx)*

Abstract: This paper presents a novel real-time implementation of the Short-Time Fourier Transform (STFT) for surface electromyography (sEMG) on an STM32H7 microcontroller. The system acquires 16-bit signals at 1 kHz, applies DC removal and Hann windowing, and performs a 256-point FFT using CMSIS-DSP. Processed data is transmitted over UART with CRC for reliable communication. A complementary Python framework enables synchronized data storage, spectrogram visualization, and offline validation against NumPy/SciPy, demonstrating high correlation. Throughput, memory, and latency analyses confirm real-time operation, enabling interpretable spectral features for fatigue monitoring and embedded machine learning applications, facilitating efficient on-device processing.

Keywords: surface EMG, STFT, embedded signal processing, STM32H7, CMSIS-DSP, real-time.

1. INTRODUCCIÓN

La electromiografía de superficie (sEMG) es una técnica no invasiva ampliamente utilizada en biomecánica, rehabilitación y control neuromuscular para inferir la activación muscular a partir de potenciales eléctricos medidos sobre la piel. Dado que el sEMG es cuasi-estacionario y su contenido espectral evoluciona con el tiempo -por ejemplo, durante la fatiga muscular- resulta necesario un análisis que combine resolución temporal y frecuencial. En este contexto, la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT) es una herramienta estándar para obtener espectrogramas interpretables y comparar cambios de energía en bandas relevantes del sEMG.

Revisiones y tutoriales recientes sistematizan las mejores prácticas de análisis en frecuencia del sEMG, discuten el muestreo, el preacondicionamiento y la interpretación de medidas espectrales, con énfasis en aplicaciones clínicas y de ergonomía. (Muceli and Merletti, 2024)

Asimismo, se recomienda típicamente un filtro pasabanda de 20–500 Hz y tasas de muestreo de ≥1kHz (preferentemente ≈2kHz o más) para preservar el espectro útil del sEMG y evitar aliasing, lo que respalda configuraciones de adquisición a varios kHz utilizadas en investigación y aplicaciones en línea. (McManus et al., 2020).

El procesamiento en tiempo real directamente en el dispositivo (on-device) cobra relevancia en aplicaciones portátiles y embebidas, ya que reduce la latencia, el ancho de banda de transmisión y la huella energética, a la vez que habilita retroalimentación inmediata (p. ej., biofeedback o control). Los microcontroladores de alto desempeño, como la familia STM32H7 (núcleo Arm® Cortex®-M7 de hasta 480 MHz, con FPU y extensiones DSP) (STMicroelectronics, 2023), ofrecen el margen de cómputo necesario para implementar STFT continuas con solapes moderados manteniendo tiempos de respuesta estrictos.

⋆ Este trabajo contó con el apoyo financiero de SECIHTI.

2. ESTUDIO DE LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER Y STFT

En esta sección se repasan, los fundamentos que se usarán en el resto del trabajo: la DFT y su cómputo eficiente mediante FFT, y la STFT como herramienta para mapear energía en el plano tiempo-frecuencia. Se explica el papel de la ventana y la longitud de análisis en el equilibrio entre resolución temporal y espectral.

2.1 Transformada de Fourier

De acuerdo con (Mayorga Bayas and Candel Layana, 2013), la transformada de Fourier es una particularización de la transformada de Laplace con $s = j\omega$, siendo $\omega = 2\pi f$, y se define como:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t}\,dt \tag{1}$$

La transformada inversa permite recuperar la señal original:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t}\, d\omega \tag{2}$$

2.2 Transformada Discreta de Fourier (DFT)

La Transformada Discreta de Fourier (DFT, del inglés *Discrete Fourier Transform*) es el equivalente discreto de la Transformada de Fourier. En este caso, la variable continua t se reemplaza por la variable discreta nT_s, siendo T_s el período de muestreo (Mayorga Bayas and Candel Layana, 2013). Además, la frecuencia también se discretiza en N puntos igualmente espaciados.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, 1, \ldots, N-1 \tag{3}$$

La DFT convierte una secuencia de N muestras en otra secuencia de N valores en el dominio de la frecuencia. El inconveniente de implementar esta fórmula directamente es el alto costo computacional. Para cada $X[k]$ deben recorrerse los N valores de $x[n]$. Como existen N posibles valores de k, el número total de operaciones es:

$$N \times N = N^2.$$

2.3 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La FFT no constituye una nueva transformada, sino un algoritmo eficiente para calcular la DFT. Se basa en aprovechar la periodicidad y simetría del factor de rotación complejo (*twiddle factor*):

$$W_N^k = e^{-j\frac{2\pi}{N}k}, \quad W_N^{k+N} = W_N^k, \quad W_N^{N-k} = W_N^{-k}.$$

El algoritmo de Cooley–Tukey descompone la DFT de N puntos en DFTs de menor tamaño. Una DFT de N puntos se divide en dos DFTs de $(N/2)$ puntos, cada una de ellas en dos DFTs de $(N/4)$ puntos, y así sucesivamente, hasta obtener DFTs de 2 puntos (caso base del algoritmo). De esta manera, el costo computacional se reduce de $O(N^2)$ a $O(N \log N)$, lo que permite un cálculo mucho más eficiente (Mayorga Bayas and Candel Layana, 2013).

2.4 Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT)

La Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT, por sus siglas en inglés *Short-Time Fourier Transform*) es una herramienta popular y poderosa para la extracción de características en señales EMG. Proporciona una valiosa representación tiempo-frecuencia que describe la amplitud compleja en función de la frecuencia y el tiempo de la señal.

Antes de la formulación discreta utilizada en este trabajo, la STFT puede definirse en su forma continua, tal como se presenta en (Karheily et al., 2019).

$$\mathrm{STFT}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\, g(t-\tau)\, e^{-j2\pi f t}\, dt, \tag{4}$$

donde $g(t-\tau)$ es la ventana centrada en el instante τ. Esta forma continua es conceptualmente equivalente a la formulación discreta mostrada a continuación, que es la utilizada en sistemas digitales. Para señales muestreadas, la STFT se obtiene discretizando la integral anterior y reemplazando las variables continuas por sus equivalentes en tiempo discreto.

La definición matemática de la STFT se expresa considerando $x(n)$ como la señal de entrada en el instante n, $w(n)$ como la función ventana de longitud M, R como el tamaño del salto y m como el índice de la ventana (Oppenheim and Schafer, 2014):

$$X_m(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)\, w(n - mR)\, e^{-j\omega n} \tag{5}$$

La STFT puede interpretarse como la DTFT de la señal segmentada por ventanas, centrada en los intervalos de tiempo mR entre análisis consecutivos. La DTFT total de la señal equivale a la suma de estas DTFT subsecuentes a lo largo del tiempo. Por lo tanto, la serie de FFT aplicadas a cada segmento de la señal se denomina STFT.

Efecto de la ventana. El desempeño de la STFT depende tanto de la señal como de la función ventana empleada. El concepto de ventana consiste en asignar un valor cero a todas las muestras fuera de la sección de interés, manteniendo esta última sin cambios. Por ejemplo, una ventana rectangular puede localizar propiedades no estacionarias, pero introduce discontinuidades en los bordes que generan artefactos, ya que las interferencias se dispersan en toda la banda de frecuencia (Moznuzzaman and Ide, 2023).

Compromiso tiempo-frecuencia. En la STFT la ventana tiene longitud finita, lo que causa una disminución de la resolución en frecuencia. Existe un compromiso entre buena resolución temporal y buena resolución frecuencial: cuanto más estrecha sea la ventana, mejor será la localización temporal pero peor la resolución en frecuencia, y viceversa (Coomonte, 2006).

En resumen:

- Ventana estrecha → buena resolución en el tiempo y pobre resolución en frecuencia.
- Ventana ancha → buena resolución en frecuencia y pobre resolución en el tiempo.

3. METODOLOGÍA

En esta sección se describe el procedimiento experimental y de procesamiento: protocolo de adquisición (bloques alternados de reposo/activación a f_s=1 kHz), preprocesamiento (conversión a voltaje, centrado por ventana y ventana de Hann) y cálculo de la STFT (RFFT, magnitud de lado único y escalado coherente). Se detallan las configuraciones evaluadas (N y H), la comparación MCU-Python (métricas RMSE y correlación) y la medición del desempeño en el microcontrolador (tiempo por hop y carga de CPU).

3.1 Verificación de integridad con CRC

Para garantizar la integridad de los paquetes transmitidos se emplea un CRC (*Cyclic Redundancy Check*). El CRC es un método de detección de errores basado en operaciones polinomiales sobre los datos del paquete, que permite identificar alteraciones accidentales durante la transmisión en el enlace serie. En este trabajo se implementó un CRC32 siguiendo la especificación IEEE 802.3, cuyo cálculo se realizó mediante la función `my_crc32`.

El valor obtenido se añade al final de cada paquete y es verificado en el receptor, asegurando que tanto los datos temporales como los espectros de magnitud no hayan sufrido corrupción.

3.2 Sensado

MyoWare 2.0 Muscle Sensor (Advancer Technologies) se empleó como interfaz piel-electrónica. El módulo entrega tres salidas analógicas: *RAW* (EMG amplificado banda ancha), *RECT* (rectificado de onda completa) y *ENV* (envolvente rectificada y filtrada a baja frecuencia).

Se empleó la salida *RAW*, que presenta una ganancia fija de aproximadamente 200 y está centrada en Vs/2, siendo la indicada para análisis espectral del sEMG. Esta salida corresponde al voltaje ya amplificado por el sensor, mientras que el potencial real sobre la piel sería $\approx V_{\mathrm{RAW}}/200$. El sensor integra además un filtro pasa-banda activo de primer orden con cortes en ∼20–500 Hz y recomienda orientación longitudinal de los electrodos a las fibras musculares. La salida *ENV* está pensada para control proporcional (fuerza) y biofeedback. El módulo se alimentó a 3.3 V y se muestreó su salida con el ADC1 del STM32H743VIT6 a 1 kHz y 16 bits (Technologies, 2022).

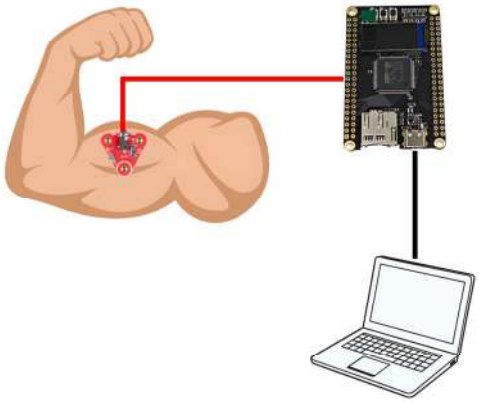


Fig. 1. Interfaz MyoWare 2.0 y STM32H743VIT6.

De acuerdo con la guía avanzada del fabricante, el sensor MyoWare implementa un filtro pasa-banda activo de primer orden con frecuencias de corte aproximadas en 20.8 Hz (alta) y 498.4 Hz (baja), lo que define una banda efectiva de 20–500 Hz alineada con el contenido principal del sEMG. En consecuencia, el espectro que llega al ADC ya está limitado: las componentes por debajo de unos 20 Hz (artefactos de movimiento y offset) y por encima de unos 500 Hz (ruido de alta frecuencia) son atenuadas por el filtrado analógico, cuya pendiente es de −20 dB/dec al ser de primer orden.

Dado que el sistema muestrea a 1 kHz (frecuencia de Nyquist = 500 Hz), la interpretación de los espectrogramas debe centrarse en la banda útil de aproximadamente 20–450 Hz. Los *bins* cercanos a 500 Hz mostrarán una caída natural en potencia debido a la respuesta del sensor. Este recorte analógico previo explica la pérdida progresiva de energía hacia los extremos de banda y justifica ajustar el eje de frecuencia en las figuras (por ejemplo, limitando a 0–500 Hz o resaltando la región 20–450 Hz).

3.3 Plataforma embebida y arquitectura general

El sistema se implementó sobre un STM32H743VIT6 (núcleo Arm Cortex-M7 con FPU y extensiones DSP), utilizando ADC1, TIM3, DMA y USART1. El TIM3 genera un TRGO (evento de actualización) que sincroniza al ADC1 para muestrear a 1 kHz; el ADC opera a 16 bits en modo single-ended y entrega datos en DMA circular. Se emplean callbacks de mitad y fin de buffer para producir hops de 128 muestras. En cada callback se invalida la D-Cache sobre la región DMA antes de leerla, a fin de asegurar coherencia. La transmisión de resultados se realiza por UART1 a 921600 baudios, con DMA y doble buffer (confirmación por callback de fin de transmisión).

Bloques principales (MCU): TIM3 → ADC1(DMA) → frame 256 con solape 50% → DC-removal + Hann → RFFT (CMSIS-DSP) → magnitud y escalado → paquete + CRC32 → UART1(DMA).

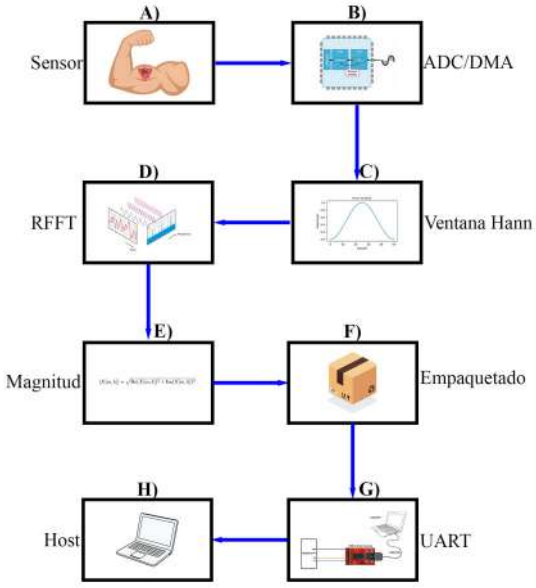


Fig. 2. Flujo general de adquisición y procesamiento. A) Sensor MyoWare, B) muestreo con ADC/DMA, C) aplicación de ventana Hann, D) transformada rápida real (RFFT), E) cálculo de magnitud y escalado, F) empaquetado de datos con CRC32, G) transmisión mediante UART, H) recepción y visualización en el host.

3.4 Medición de latencia extremo a extremo

Además del tiempo por hop t_{STFT} medido con el contador de ciclos (DWT-¿CYCCNT) en el microcontrolador, se evaluó la latencia extremo a extremo del enlace STM32-host. Para ello se añadió un campo de marca de tiempo t_{STM} (en ms, obtenido con `HAL_GetTick()`) a cada paquete transmitido por UART.

En el host (Python) se registró, para cada frame m, el instante de recepción $t_{\mathrm{PC}}(m)$ usando `time.perf_counter()`, y se sincronizaron ambos relojes restando el valor del primer frame:

$$t_{\mathrm{lat}}(m) = \big(t_{\mathrm{PC}}(m) - t_{\mathrm{PC}}(0)\big) - \big(t_{\mathrm{STM}}(m) - t_{\mathrm{STM}}(0)\big). \quad (6)$$

Esta magnitud captura la contribución conjunta del transporte UART, la pila USB/serie del sistema operativo y el procesamiento en el script Python, una vez calculada la STFT en el STM32.

3.5 Adquisición y formación de ventanas.

- **Muestreo y buffering.** El ADC llena un buffer circular de `uint16_t` de longitud 256 (dos mitades de 128). Cada interrupción de mitad o fin de conversión entrega 128 muestras nuevas (hop), que se "empujan" a un búfer deslizante de $N = 256$ para conformar una ventana con 50% de solape.
- **Unidades.** El valor crudo se convierte a voltios con el factor $(3.3\,\mathrm{V}/65536)$. Antes de la FFT se elimina el DC por ventana (sustracción de la media).
- **Ventana.** Se aplica la ventana de Hann (Pinedo Puig, 2024):

$$w[n] = \frac{1}{2}\left(1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)\right), \quad 0 \le n \le N-1. \quad (7)$$

3.6 Implementación de la STFT con RFFT (CMSIS-DSP)

Para la implementación de la STFT en el microcontrolador se empleó la librería CMSIS-DSP, utilizando la función `arm_rfft_fast_f32()` (STMicroelectronics, 2018) sobre la señal real previamente ventaneada. El formato de salida se organiza de la siguiente manera: DC en `fft_out[0]`, Nyquist en `fft_out[1]`, y para $1 \le k < N/2$: la parte real en `fft_out[2k]`, la parte imaginaria en `fft_out[2k+1]`. La magnitud se calcula como:

$$|X[m,k]| = \sqrt{\mathrm{re}^2 + \mathrm{im}^2} \quad (8)$$

Escalado de amplitud (espectro de un lado). Se corrige la ganancia coherente de la ventana de Hann (≈ 0.5) con un factor $\times 2$ y se normaliza por N. Además, para obtener el espectro de un solo lado se multiplican por 2 los bins interiores $1 \le k \le N/2 - 1$, dejando DC y Nyquist sin duplicación:

$$A[m,0] = \frac{2}{N}\,|X[m,0]| \quad (9)$$

$$A\big[m,\tfrac{N}{2}\big] = \frac{2}{N}\,\big|X\big[m,\tfrac{N}{2}\big]\big| \quad (10)$$

$$A[m,k] = \frac{4}{N}\,|X[m,k]|, \quad 1 \le k \le \tfrac{N}{2} - 1 \quad (11)$$

Resoluciones. Con $f_s = 1$ kHz y $N = 256$ se obtiene:

- Resolución frecuencial: $\frac{f_s}{N} = \frac{1000}{256} \approx 3.906$ Hz.
- Velocidad de refresco (ventanas por segundo): $\frac{f_s}{H} = \frac{1000}{128} = 7.81$.

3.7 Empaquetado y transmisión serie

Cada ventana produce un paquete binario en formato *little-endian* con la estructura:

```
[sync | frame_idx | n_time | n_bins |
data (time[N] + mag[BINS]) | crc32]
```

donde:

- sync = 0xAA55AA55
- n_time = 256
- n_bins = 129

El campo `data` contiene primero la señal temporal (en voltios, sin sustracción de DC) y luego la magnitud normalizada del espectro de un solo lado. El CRC32 utilizado corresponde a la especificación IEEE 802.3 (estilo zlib), implementado en la función `my_crc32`.

3.8 Software de host y almacenamiento

En el host, un script Python abre el puerto serie a 921600 baudios, sincroniza con `SYNC_WORD`, verifica CRC32 y registra dos archivos CSV: uno temporal (*_temporal.csv) y otro espectral (*_espectro.csv). El script también guarda un archivo de configuración (*.json) con frecuencia de muestreo, numero de frames y errores CRC, y puede mostrar espectrogramas en vivo o al final de la sesión.

4. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de la adquisición y análisis STFT de sEMG, la comparación MCU–Python y el desempeño en el MCU. Se muestran señales temporales y espectrogramas para distintas configuraciones (N=256, 1024, 2048) además, se evalúa la equivalencia mediante RMSE y correlación, y se resumen los tiempos por hop y la carga de CPU medidos con `DWT->CYCCNT`.

4.1 Adquisición y visualización tiempo–frecuencia

Protocolo de adquisición. Se registraron 27 s de sEMG con bloques alternados de 3 s de reposo y 3 s de activación (R–A–R–A–...), iniciando en reposo. Durante la activación, el sujeto realiza una contracción del músculo objetivo; en reposo mantiene relajación. La frecuencia de muestreo fue $f_s = 1\,\mathrm{kHz}$.

Preprocesamiento. Cada ventana se convierte a voltaje, se centra (sustracción de media por ventana) y se multiplica por una ventana de Hann.

Parámetros de STFT. Se emplea RFFT (CMSIS–DSP), magnitud de lado único y corrección coherente de

Hann. Para ilustrar el compromiso tiempo–frecuencia se muestran tres configuraciones representativas: (i) N=256, H=128 (50% de solape; $\Delta f \approx 3.91$ Hz; T_{win}=256 ms; T_{hop}=128 ms), (ii) N=1024, H=256 (75%; $\Delta f \approx 0.98$ Hz; T_{win}=1.024 s; T_{hop}=256 ms), y (iii) N=2048, H=1024 (50%; $\Delta f \approx 0.49$ Hz; T_{win}=2.048 s; T_{hop}=1.024 s).

Visualizaciones. Para cada configuración se presentan la señal temporal del segmento completo y su espectrograma con la misma escala (dB) para comparación directa: Fig. 3 y 4 (N=256, H=128), Fig. 5 y 6 (N=1024, H=256), y Fig. 7 y 8 (N=2048, H=1024). Las magnitudes lineales $|X[m,k]|$ se transformaron a decibelios según $A_{\text{dB}} = 20\log_{10}\big(\max(A,\varepsilon)\big)$ con $\varepsilon = 10^{-12}$ para evitar valores indefinidos. El rango dinámico del mapa de color se determinó automáticamente a partir de los valores mínimo y máximo de cada espectrograma, sin aplicar recorte (*clipping*) ni normalización adicional.

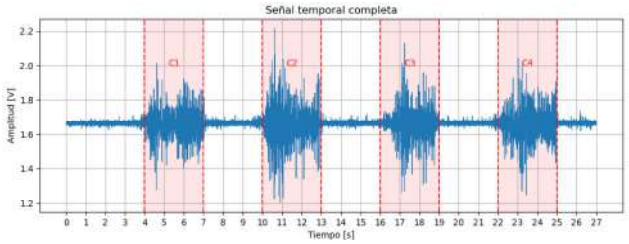


Fig. 3. Señal sEMG sujeto 1.

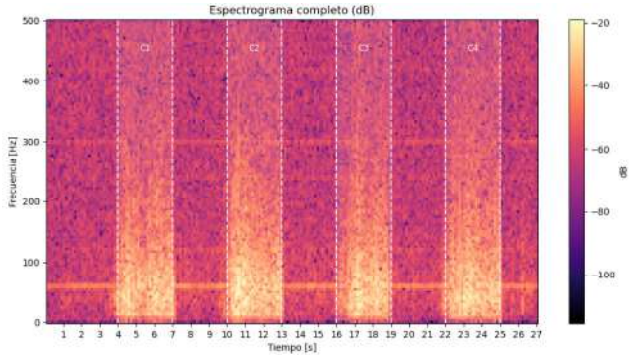


Fig. 4. Espectrograma. N=256, H=128 (50%). Δf = 3.91 Hz; T_{win} = 256 ms; T_{hop} = 128 ms.

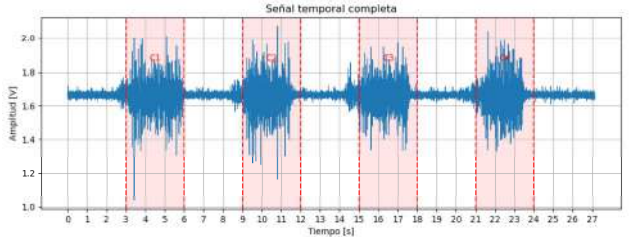


Fig. 5. Señal sEMG sujeto 2.

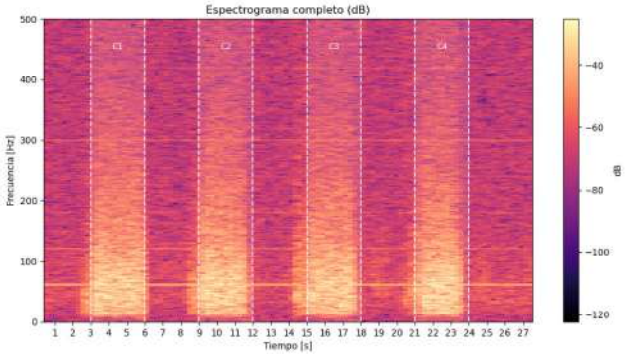


Fig. 6. Espectrograma. N=1024, H=256 (75%). Δf = 0.98 Hz; T_{win} = 1.024 s; T_{hop} = 256 ms.

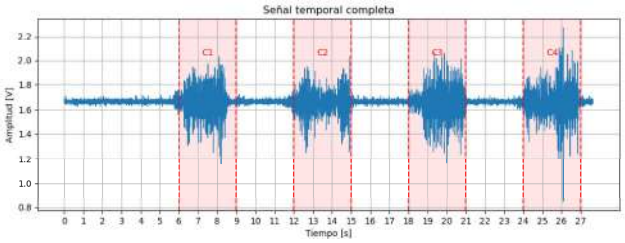


Fig. 7. Señal sEMG sujeto 3.

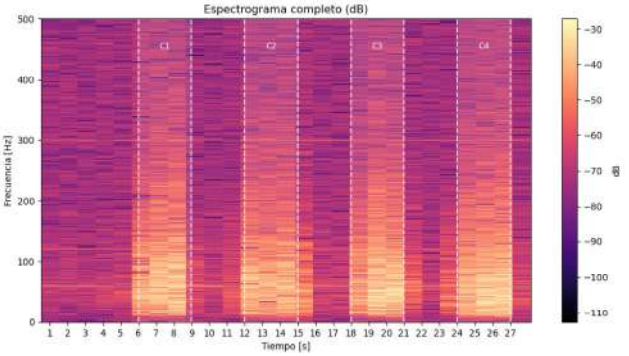


Fig. 8. Espectrograma. N=2048, H=1024 (50%). Δf = 0.49 Hz; T_{win} = 2.048 s; T_{hop} = 1.024 s.

Los tres espectrogramas muestran el mismo patrón R–A, pero la resolución en frecuencia y la suavidad cambian con N. Con N=256, H=128 las bandas de energía aparecen más gruesas y granulosas, con "bloques" de frecuencia visibles; es la opción de baja latencia y mayor cadencia temporal. Con N=1024, H=256 se obtiene un equilibrio: las crestas espectrales son más definidas y el ruido se promedia mejor. Con N=2048, H=1024 las bandas son aún más limpias y estrechas, pero el inicio/fin de cada activación se ve más difuminado por la mayor ventana.

4.2 Equivalencia MCU–Python

Para verificar la consistencia del procesamiento embebido, se compararon los espectrogramas generados en el STM32 y en Python bajo parámetros idénticos (misma ventana,

N, H y escalado la misma referencia). Las Fig. 9, 10 y 11 muestran la comparación visual para N=256, 1024 y 2048, respectivamente.

La similitud se cuantificó con el RMSE y la correlación de Pearson calculados sobre todo el mapa tiempo–frecuencia; los resultados para las tres configuraciones se resumen en la Tabla 1.

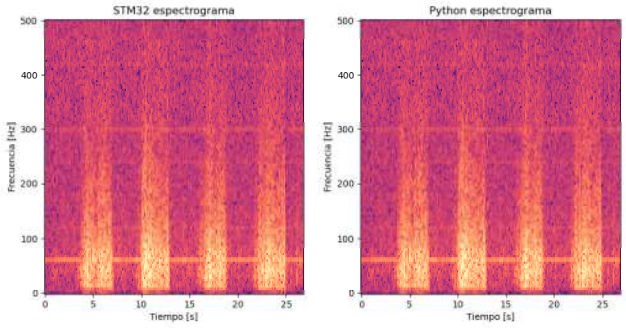


Fig. 9. Comparación de espectrogramas: A) STM32. B) Python. Configuración N=256, H=128; Se observa concordancia visual sin diferencias apreciables.

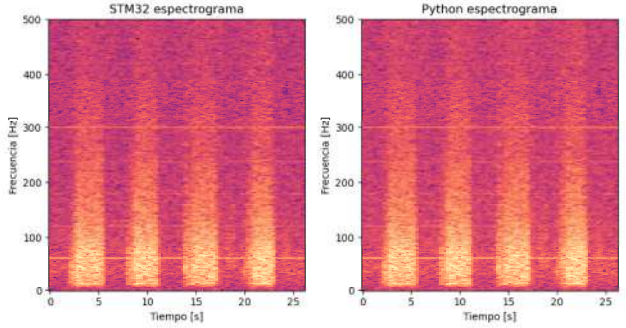


Fig. 10. Comparación de espectrogramas: A) STM32. B) Python. Configuración N=1024, H=256; Las crestas espectrales coinciden y el ruido se promedia de forma similar.

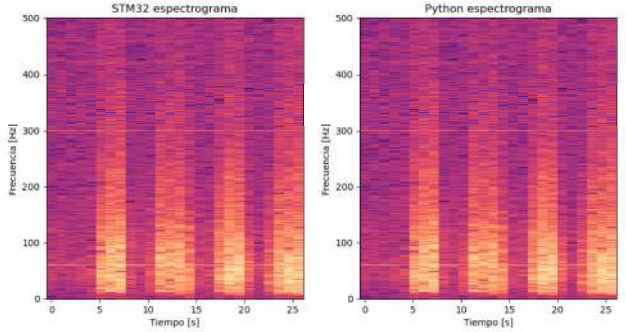


Fig. 11. Comparación de espectrogramas: A) STM32. B) Python. Configuración N=2048, H=1024; La correspondencia es prácticamente total, con bandas más limpias por el mayor N.

Tabla 1. Equivalencia MCU–Python (métricas sobre el mapa tiempo–frecuencia).

N	H	RMSE	r
256	128	0.000048	1.0000
1024	256	0.000007	1.0000
2048	1024	0.000003	1.0000

4.3 Desempeño en el MCU

El tiempo por hop t_{STFT} se midió con el contador de ciclos `(DWT->CYCCNT)`, promediando 30–50 repeticiones por configuración. La Tabla 2 resume t_{STFT} (media ± DE) y la carga de CPU, calculada como $\mathrm{CPU}[\%] = 100 \cdot t_{\mathrm{STFT}}/T_{\mathrm{hop}}$, con $T_{\mathrm{hop}} = H/f_s$ y $f_s = 1$ kHz. Se observa que t_{STFT} crece con N (mientras que H solo afecta la tasa de ventanas por segundo), y que todas las configuraciones quedan por debajo del 0.2% de uso de CPU.

Tabla 2. Resumen de resultados (media ± DE) para $f_s = 1$ kHz.

NFFT	**HOP**	t_{STFT} **[ms]**	**CPU[%]**
256	128	0.075 ± 0.000	0.059%
512	256	0.155 ± 0.000	0.061%
512	128	0.155 ± 0.000	0.121%
1024	256	0.312 ± 0.000	0.122%
1024	512	0.314 ± 0.000	0.061%
2048	512	0.669 ± 0.001	0.131%
2048	1024	0.669 ± 0.000	0.065%

4.4 Latencia extremo a extremo STM32–host

Además del tiempo por hop t_{STFT} medido con el contador de ciclos `DWT->CYCCNT` en el microcontrolador, se evaluó la latencia extremo a extremo del enlace STM32–host. Para ello se añadió un campo de marca de tiempo t_{STM} (en ms, obtenido con `HAL_GetTick()`) a cada paquete transmitido por UART.

En el host (Python) se registró, para cada frame m, el instante de recepción $t_{\mathrm{PC}}(m)$ usando `time.perf_counter()`, y se sincronizaron ambos relojes restando el valor del primer frame:

$$t_{\mathrm{lat}}(m) = \big(t_{\mathrm{PC}}(m) - t_{\mathrm{PC}}(0)\big) - \big(t_{\mathrm{STM}}(m) - t_{\mathrm{STM}}(0)\big). \quad (12)$$

Esta magnitud captura la contribución conjunta del transporte UART, la pila USB/serie del sistema operativo y el procesamiento en el script Python, una vez calculada la STFT en el STM32.

Como se observa en la Tabla 3, para configuraciones con NFFT $\leq$ 512 la latencia extremo–a–extremo se mantiene claramente por debajo del milisegundo (Lat.med = 0.39–0.67 ms, Lat.max $\approx$ 1.9 ms), es decir, dos órdenes de magnitud menor que la longitud de ventana (256–512 ms) y siempre menor que el intervalo entre hops. En este régimen la contribución del enlace STM32–host es prácticamente despreciable frente al retardo inherente del análisis STFT.

Al aumentar NFFT a 1024 y 2048, la latencia pasa a estar dominada por el tiempo de transmisión UART: las latencias medias se sitúan entre 26 y 78 ms y las

máximas entre 52 y 156 ms, en concordancia con los tiempos teóricos de envío de cada paquete a 921,6 kbaud. No obstante, incluso en estos casos la latencia STM32–host permanece por debajo del intervalo entre hops, evitando la acumulación de retraso en la canalización y permitiendo operación continua.

Tabla 3. Latencias STM32–host para distintas configuraciones.

NFFT	HOP	Lat.med [ms]	Lat.min [ms]	Lat.max [ms]
256	128	0.60	0.00	1.89
512	256	0.39	0.00	1.34
512	128	0.67	0.00	0.41
1024	256	52.89	0.00	105.85
1024	512	26.08	0.00	52.44
2048	512	78.30	0.00	156.46
2048	1024	37.81	0.00	75.43

5. CONCLUSIÓN

El trabajo presentado demostró la viabilidad de implementar una Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT) en tiempo real sobre un microcontrolador STM32H7, logrando una ejecución eficiente y de baja carga computacional. La arquitectura propuesta, basada en ADC, DMA y RFFT con la librería CMSIS-DSP, permitió procesar señales sEMG de 16 bits a 1 kHz con solape del 50%, obteniendo espectrogramas consistentes y de alta correlación con el procesamiento en Python.

Los resultados experimentales evidenciaron que el sistema mantiene latencias sub-milisegundo para configuraciones con NFFT $\leq$ 512 y latencias del orden de decenas de milisegundos para NFFT mayores (1024 y 2048), siempre por debajo del intervalo entre hops, así como un uso de CPU menor al 0.2%. Esto confirma su capacidad para operación continua y aplicaciones portátiles.

En conjunto, el desarrollo valida el potencial del STM32H7 como plataforma para análisis espectral embebido en electromiografía de superficie, abriendo la posibilidad de integrar algoritmos de aprendizaje automático y monitoreo de fatiga directamente en el dispositivo, sin dependencia de un host externo.

Si bien el STM32H7 resulta sobrado para la implementación de una STFT aislada, su capacidad de cómputo y recursos de memoria lo convierten en una plataforma idónea para extender el sistema hacia tareas de clasificación, monitoreo de fatiga o algoritmos DSP más complejos en futuras versiones, garantizando margen de procesamiento y estabilidad temporal en aplicaciones embebidas de mayor exigencia.

ACKNOWLEDGEMENTS

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte del Instituto Tecnológico de Morelia y de SECIHTI para la realización de este trabajo. Asimismo, se expresa agradecimiento a todos los participantes del estudio por sus valiosas aportaciones.

6. LISTA DE ACRÓNIMOS

ADC	Analog-to-Digital Converter
CMSIS-DSP	Cortex Microcontroller Software Interface Standard
CRC	Cyclic Redundancy Check
CRC32	32-bit Cyclic Redundancy Check (IEEE 802.3)
CSV	Comma-Separated Values
CYCCNT	Cycle Counter register (DWT)
DC	Direct Current (componente continua)
DMA	Direct Memory Access
DWT	Data Watchpoint and Trace unit
EMG	Electromyography
sEMG	Surface Electromyography
FFT	Fast Fourier Transform
FPU	Floating Point Unit
H	Hop size (avance de ventana)
JSON	JavaScript Object Notation
MCU	Microcontroller Unit
RFFT	Real Fast Fourier Transform
RMSE	Root Mean Square Error
STFT	Short-Time Fourier Transform
TRGO	Trigger Output del temporizador (Timer update event)
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
NFFT	Number of FFT points
fs	Sampling frequency
Vs	Voltaje de alimentación del sensor
Lat.med	Latencia media
Lat.min	Latencia mínima
Lat.max	Latencia máxima
R	Relajación
A	Activación

REFERENCES

Coomonte, R. (2006). Sistema de reconocimiento de personas mediante su patrón de iris basado en la transformada wavelet. URL `https://oa.upm.es/1329/`. Tesis de Grado, Universidad Politécnica de Madrid, España.

Karheily, B., DonCarlo, L., and Shkolyar, A. (2019). Short-time fourier transform for physiological signal analysis. *Biomedical Signal Processing and Control*, 52, 1–12.

Mayorga Bayas, J.I. and Candel Layana, C.A. (2013). Implementación de la transformada rápida de fourier con nios ii y presentación de la misma en monitor vga. Tesis de Telecomunicaciones, ESPOL. Accedido: 2025-10-08.

McManus, L., De Vito, G., and Lowery, M.M. (2020). Analysis and biophysics of surface emg for physiotherapists and kinesiologists: toward a common language with rehabilitation engineers. *Frontiers in Neurology*, 11, 576729. doi:10.3389/fneur.2020.576729. URL `https://doi.org/10.3389/fneur.2020.576729`.

Moznuzzaman and Ide, S. (2023). Analysis of aging effect on lower limb muscle activity using short time fourier transform and wavelet decomposition of electromyography signal. *AIP Advances*, 13(5), 055011. doi:10.1063/5.0148044.

Muceli, S. and Merletti, R. (2024). Tutorial. frequency analysis of the surface emg signal: best prac-

tices. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 79, 102937. doi:10.1016/j.jelekin.2024.102937. URL https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2024.102937.

Oppenheim, A.V. and Schafer, R.W. (2014). *Discrete-time signal processing*. Pearson Education Limited, Harlow, England, 3rd edition.

Pinedo Puig, E. (2024). *Valoración de la coherencia espectral en registros de EMG para la detección de la neuropatía del pie diabético*. Master's thesis, Universitat Politècnica de València, España. URL https://riunet.upv.es/handle/10251/212034.

STMicroelectronics (2018). *AN4841: Digital signal processing for STM32 microcontrollers using CMSIS*. Application Note, Rev. 2.

STMicroelectronics (2023). *STM32H743 Datasheet*. DS12110 Rev. 10.

Technologies, A. (2022). *MyoWare 2.0 Advanced Guide*. Updated version.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Comparative Analysis of Solar Unmanned Aerial Vehicles: Fixed-Wing vs. Quadcopter Architectures

Castrejón Salgado, Hugo Iván *, Olivares Peregrino, Víctor Hugo *, Ponce Silva, Mario *

** Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México*

(e-mail: {m24ce120, victor.op, mario.ps}@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: One of the main challenges facing conventional unmanned aerial vehicles (UAVs) is their limited flight range, which drastically restricts their use in long-duration missions. This article presents a comparative analysis of the two predominant architectures of solar-powered UAVs documented in recent literature: fixed-wing and multirotor, specifically quadcopters. The main objective of this research is to provide an objective technical basis to facilitate the selection of the most suitable platform for specific operational requirements. The methodology is based on a review and technical comparison of key performance aspects, such as weight, endurance, power system, and design limitations inherent to each architecture. The analysis reveals that fixed-wing UAVs offer significant advantages in terms of flight range and energy efficiency, as they are capable of prolonged flights thanks to the large surface area of their wings for solar panels and their aerodynamically efficient cruise flight. In contrast, quadcopters excel in operational versatility, as they have vertical takeoff and landing capabilities and can hover, making them ideal for precision tasks in confined spaces, although with considerably shorter flight times due to high energy consumption for lift and limited space for solar cells.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, Fixed-Wing, Quadcopter, Solar energy, Flight autonomy.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores retos que enfrentan los vehículos aéreos no tripulados (UAVs, por sus siglas en inglés) convencionales es su poca autonomía, lo que limita drásticamente su uso en misiones largas. Mientras que los UAVs comerciales que usan baterías suelen volar entre 20 y 90 minutos (Elouarouar and Medromi, 2022), aplicaciones como el monitoreo ambiental, la vigilancia de grandes áreas o la inspección de infraestructuras críticas necesitan tiempos de vuelo mucho más extensos. Esta necesidad ha motivado la búsqueda de fuentes de energía alternativas, siendo la integración de paneles solares una de las soluciones más prometedoras. (Li, 2021, Chu et al., 2021)

El campo de los UAVs solares ha avanzado notablemente en la última década. Los trabajos pioneros, como los UAVs Sunrise I y II de Boucher (Kranjec et al., 2018), sentaron las bases para el diseño de aeronaves de ala fija y demostraron que los vuelos prolongados eran posibles. Investigaciones más recientes han seguido explorando tanto diseños de ala fija (Danjuma et al., 2021, Chu et al., 2021, Li, 2021, Morton et al., 2015) como multirrotores, especialmente en los UAVs cuadricópteros (Kingry et al., 2018, Goh et al., 2019, Elagib and Karaarslan, 2023, Abidali et al., 2024), cada uno con sus propios desafíos técnicos. Por ejemplo, en (Kranjec et al., 2018) lograron aumentar la autonomía de un UAV de ala fija en un 6.25% usando paneles flexibles, y en (Goh et al., 2019) consiguieron un hito al realizar el primer vuelo de un cuadricóptero impulsado únicamente por energía solar, sin necesidad de baterías.

En el corazón de estos sistemas está la gestión de la energía, donde se han desarrollado convertidores de potencia cada vez más eficientes. Estos sistemas incorporan algoritmos inteligentes de seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) para extraer la máxima energía posible de los paneles solares, los cuales han evolucionado desde implementaciones basadas en microcontroladores simples como el ATmega328/P (Kranjec et al., 2018) hasta soluciones sofisticadas que utilizan redes neuronales (Danjuma et al., 2021) o convertidores multipuerto para gestionar sistemas híbridos de almacenamiento (Fares et al., 2022). Lograr un equilibrio óptimo entre el peso añadido y la eficiencia ganada es especialmente crucial en los multirrotores, donde este balance puede determinar el éxito o el fracaso de la misión (Elouarouar and Medromi, 2022, Abidali et al., 2024).

Este artículo ofrece una contribución al campo de los UAVs solares al presentar un análisis comparativo de las diferentes arquitecturas documentadas en la literatura reciente. El estudio tiene como objetivo proporcionar una base objetiva que facilite la selección de la plataforma más adecuada para requisitos operativos específicos.

En la sección 2, se hace una comparación entre UAVs de ala fija y cuadricópteros, centrándose en aspectos como el peso, la autonomía, y las limitaciones propias de cada diseño. En la sección 3 se analiza cómo cada arquitectura exige soluciones técnicas diferentes para maximizar el tiempo de vuelo. La sección 4 analiza que la elección no es sobre cuál UAV es mejor, sino cuál es más adecuado para el objetivo de la misión.

2. COMPARACIÓN TÉCNICA Y DE DESEMPEÑO

Incorporar paneles solares a un UAV no es sencillo, ya que implica encontrar un equilibrio entre el diseño de la aeronave, la gestión de energía y lo que se le pide que haga. Tanto los UAVs de ala fija como los multirrotores (cuadricópteros en este caso) tienen características muy diferentes que definen radicalmente su rendimiento cuando usan energía solar.

2.1 Peso, autonomía y capacidad de carga

En la Fig. 1 se muestran UAVs solares de ala fija, los cuales suelen ser ligeros, con pesos que parten desde los 0.774 kg en algunos modelos básicos y pueden superar los 10 kg en diseños más avanzados para misiones largas (Kranjec et al., 2018). Su forma aerodinámica les permite volar de manera eficiente, consumiendo poca energía, entre 8.5 W y 47 W (Li, 2021, Morton et al., 2015)). Esto se traduce en una gran autonomía, pueden volar más de 2.5 h con buen sol, e incluso hay diseños que alcanzan hasta 30 h en el aire (Danjuma et al., 2021). Eso sí, su carga útil es limitada, entre 0.1 kg y 0.25 kg en modelos pequeños (da Silva and Pacheco, 2021, Sahwee et al., 2023).

Por su parte, los cuadricópteros solares que se muestran en la Fig. 2, pueden ser ultraligeros de apenas 71 gramos (Abidali et al., 2024) hasta prototipos más robustos de 8 kg (Kingry et al., 2018). Su autonomía es considerablemente más corta; mientras un micro UAV puede volar unos 3.5 min (Abidali et al., 2024), los modelos híbridos logran entre 8 y 10 min (Xu et al., 2022). Aunque su capacidad de carga suele ser limitada, existen diseños, como el presentado en (Ying et al., 2019), que están pensados para transportar cargas de 3 a 5 kg, ideal para tareas como la fumigación en agricultura.

2.2 Uso de paneles solares

La gran ventaja de los UAVs de ala fija es que sus alas ofrecen una superficie amplia y continua para instalar paneles solares (ver Fig. 1). Por ejemplo, en (Kranjec et al., 2018) se utilizó un área de apenas 0.06 m² para generar hasta 15 W, mientras que en (Morton et al., 2015), con una envergadura de 4 metros y 64 celdas solares, podía teóricamente alcanzar los 180 W. Esta relación entre área disponible y potencia generada es tan favorable que permite producir más energía de la que se consume, logrando un balance positivo (Morton et al., 2015).

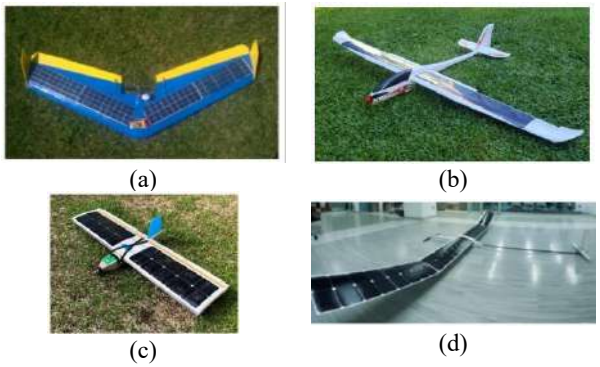


Fig. 1. UAVs solares de ala fija, (a) Modelo comercial de UAV con sistema fotovoltaico (Kranjec et al., 2018), (b) UAV solar 'Sun' desarrollado en (Chu et al., 2021), (c) UAV solar diseñado en (Sahwee et al., 2023), (d) UAV solar desarrollado en el Centro de Robótica Distribuida (Morton et al., 2015).

En los cuadricópteros, el espacio disponible para paneles es mucho menor y, además, está fragmentado entre los distintos brazos del UAV (ver Fig. 2). Para generar potencia significativa, a veces se necesitan soluciones extremas; por ejemplo, el prototipo de (Goh et al., 2019) usó 148 celdas solares para producir 360 W, pero esto resultó en un diseño muy grande y frágil. En modelos más pequeños, como el de (Abidali et al., 2024), un panel minúsculo de 0.0075 m² generaba 1.65 W, que no era suficiente para volar directamente, pero sí útil para recargar lentamente la batería durante el vuelo.

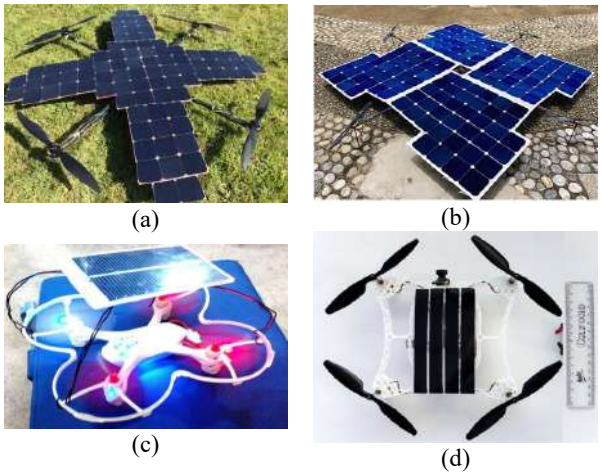


Fig. 2. UAVs solares cuadricópteros, (a) prototipo de cuadricóptero personalizado alimentado con energía solar (Kingry et al., 2018), (b) cuadricóptero totalmente alimentado por energía solar (Goh et al., 2019), (c) mini cuadricóptero modificado con panel solar (Rahman et al., 2019), (d) Micro Solarcopter con un peso de 0,071 kg desarrollado en (Abidali et al., 2024).

2.3 Tipo de motores, controladores y conversión de energía

Los UAVs de ala fija suelen equipar motores brushless DC diseñados para ser eficientes en vuelo de crucero, a menudo combinados con hélices grandes y hasta cajas de cambios. Por ejemplo, en (Morton et al., 2015) se usó un motor con un reductor 4.3:1, y en (Danjuma et al., 2021) se reporta que todo el sistema de propulsión alcanzaba una eficiencia del 85%.

Por otro lado, los cuadricópteros requieren motores más pequeños, pero de alto rendimiento para generar el empuje vertical necesario para elevarse y mantenerse estables, desde los T-Motor U8 de 100 KV (Kingry et al., 2018) hasta los RCTimer 5010-14 de 360 KV (Goh et al., 2019), con consumos para mantenerse suspendido en el aire que varían desde 12 W para un micro vehículo aéreo (MAV, por sus siglas en inglés) de 0.071 kg (Abidali et al., 2024) hasta más de 180 W por motor en UAVs de 8 kg (Kingry et al., 2018).

Para la integración de energía solar, ambos tipos requieren convertidores boost y MPPTs. En alas fijas se implementan desde controladores comerciales (Chu et al., 2021) hasta diseños personalizados con microcontroladores básicos (Kranjec et al., 2018) o redes neuronales (Danjuma et al., 2021). Los cuadricópteros priorizan electrónica compacta, usando convertidores miniaturizados (Abidali et al., 2024) o conexión directa de paneles que sacrifica eficiencia en condiciones lumínicas subóptimas (Goh et al., 2019).

2.4 Limitaciones aerodinámicas y energéticas

La principal limitación de los UAVs de ala fija es que necesitan una velocidad mínima para no perder sustentación, lo que los hace menos aptos para volar en espacios pequeños o con mucho viento. A cambio, una vez que alcanzan su velocidad de crucero, su eficiencia aerodinámica es excelente y pueden volar con muy poca potencia (Morton et al., 2015).

Los cuadricópteros, en cambio, son mucho más maniobrables y pueden despegar y aterrizar verticalmente (VTOL, por sus siglas en inglés). El problema es que mantenerse en el aire consume mucha energía. Como señala (Elouarouar and Medromi, 2022), la energía solar en un multirrotor rara vez es suficiente para alimentar los motores por sí sola; su uso principal es extender un poco la vida de la batería o alimentar sensores adicionales. Además, añadir paneles solares a una estructura ya de por sí compleja genera nuevos desafíos de peso, equilibrio y resistencia (Goh et al., 2019).

3. GESTIÓN ENERGÉTICA SEGÚN LA ARQUITECTURA DEL UAV

El éxito de un sistema de energía solar en un UAV depende de cómo se relacionen su diseño físico y la estrategia para gestionar la energía. Si el UAV es de ala fija o cuadricóptero define cuánta superficie tiene para captar luz solar, cuánta potencia necesita en cada fase del vuelo y, por lo tanto, cómo debe diseñarse su sistema fotovoltaico y de baterías.

3.1 Relación entre superficie disponible y eficiencia de celdas solares

El éxito de un UAV alimentado con energía solar depende directamente de cuánta superficie puede dedicar a paneles solares y de la eficiencia de las celdas que elige. En este aspecto, los UAVs de ala fija parten con una gran ventaja: sus alas ofrecen una superficie amplia, continua y con una forma aerodinámica perfecta para colocar paneles (ver Fig. 1). Un ejemplo claro es el trabajo presentado en (Morton et al., 2015), donde un ala de 4 metros equipada con 64 celdas SunPower C60 (de ≈23% de eficiencia) logró una potencia teórica de 180 W. Al integrar los paneles de forma tan limpia, se minimizan las sombras y se mantiene la aerodinámica, haciendo que el sistema rinda muy cerca del máximo potencial de las celdas.

La situación es muy distinta para los cuadricópteros. Su superficie útil es mucho menor, está repartida de forma fragmentada entre los brazos y, para colmo, se inclina constantemente durante el vuelo, lo que reduce la luz solar que recibe (ver Fig. 2). Por esto, la eficiencia de cada celda se vuelve un factor crítico. Para generar potencia significativa, a veces se necesitan soluciones extremas, como el prototipo presentado en (Goh et al., 2019), que usó 148 de estas mismas celdas C60 para producir 360 W. El resultado fue un dron muy grande y frágil, lo que demuestra lo difícil que es escalar esta tecnología en multirrotores sin sacrificar la practicidad.

El desafío se maximiza en los MAVs, donde el espacio es mínimo. El "Micro Solarcopter" es un caso emblemático: su panel solar mide apenas 0.0075 m² (Abidali et al., 2024). A esta escala, problemas como la resistencia de los cables finos, pequeñas sombras entre celdas o la curvatura del panel pueden reducir drásticamente la eficiencia real. El diseño, por tanto, deja de buscar la máxima potencia para priorizar el bajo peso y la capacidad de adaptarse a estructuras pequeñas.

Esta brecha en las condiciones de instalación lleva a que cada arquitectura prefiera tecnologías de celdas diferentes. Los diseños de ala fija, como el de (Danjuma et al., 2021), pueden permitirse usar celdas de silicio cristalino de alta eficiencia (como las SunPower C60 o Maxeon Gen III). En cambio, los cuadricópteros, especialmente para aplicaciones como la fumigación agrícola (Xu et al., 2022), a veces optan por celdas de película delgada. Aunque son menos eficientes, su flexibilidad y bajo peso son ideales para superficies irregulares y además funcionan mejor en días nublados.

3.2 Configuración de los arreglos FV y voltajes de operación

La forma en que se conectan eléctricamente los paneles solares para los arreglos fotovoltaicos (FV) es una decisión de diseño clave, ya que el voltaje que producen debe ser compatible con el resto del sistema del UAV. En los UAVs de ala fija, al tener tanta superficie disponible en las alas, normalmente se pueden conectar todas las celdas en serie. Esto permite alcanzar voltajes altos que encajan perfectamente con los requerimientos de los motores y las baterías. Por ejemplo, en (Kranjec et al., 2018) se logró un voltaje de trabajo de 16 V, y en (Morton et al., 2015) se llegó hasta 25.2 V. Esta estrategia no solo es eficiente, sino que en días muy soleados incluso puede permitir conectar los paneles directamente al sistema sin necesidad de un convertidor adicional, ahorrando peso y complejidad, como se demostró en (Kranjec et al., 2018).

Para los cuadricópteros, el espacio reducido y fragmentado obliga a ser más creativos. Aquí es común usar arreglos mixtos, combinando conexiones en serie y en paralelo para conseguir un balance entre el voltaje y la corriente que se puede generar. El resultado suele ser un voltaje más bajo, que puede variar desde apenas 2.3 V en MAVs (Abidali et al., 2024), hasta unos 18 V en modelos más grandes (Elouarouar and Medromi, 2022). Casi siempre, este voltaje es demasiado bajo para usarse directamente, por lo que se hace indispensable incorporar un convertidor boost con MPPT para "adaptar" la energía solar al nivel que necesitan la batería y los motores.

Una excepción a esta regla fue el cuadricóptero completamente solar de (Goh et al., 2019). Al usar un número masivo de celdas (148), su arreglo lograba generar 16.8 V, lo que permitió conectarlo directamente a los controladores de los motores sin convertidor intermedio. Sin embargo, en días con poca luz o nublados, el voltaje bajaba demasiado y el dron perdía eficiencia rápidamente, limitando su operación a condiciones ideales de sol.

La configuración del arreglo también influye en cómo afectan las sombras. En un ala fija, si una sola celda queda sombreada en un arreglo en serie, puede bajar el rendimiento de todo el panel. En un cuadricóptero, al tener paneles más pequeños y distribuidos en cada brazo, el impacto de una sombra localizada es menor, aunque esto complica el cableado y el equilibrio del sistema.

3.3 Uso de baterías

Las baterías son esenciales para compensar la naturaleza intermitente de la energía solar, actuando como reserva energética durante periodos de baja irradiancia. Sin embargo, no todas las baterías sirven para lo mismo. En los UAVs de ala fija, que vuelan de manera estable durante horas, lo que más importa es la autonomía. Por eso se prefieren baterías de ión-litio (Li-ion) o polímero de litio (LiPo) de alta capacidad, como las celdas Panasonic NCR18650B que, conectadas en configuraciones 6s6p, pueden ofrecer hasta 450 Wh de energía (Morton et al., 2015, da Silva and Pacheco, 2021). Para misiones realmente largas, incluso se están probando tecnologías más avanzadas como las baterías de litio-azufre (Li-S), que prometen casi el doble de densidad energética (unos 700 Wh/kg frente a los 300 Wh/kg de las LiPo), permitiendo vuelos de hasta 30 horas (Danjuma et al., 2021).

La situación es muy diferente en los cuadricópteros. Estos UAVs necesitan potencia explosiva para despegar, ascender y hacer maniobras bruscas, por lo que la capacidad de la batería para entregar energía rápidamente es tan importante como su duración total. Aunque las baterías LiPo son las más usadas por su buena respuesta, sufrir constantes picos de potencia las desgasta rápidamente y reduce su vida útil.

Para solucionar este problema, se han desarrollado sistemas híbridos que combinan baterías con supercapacitores (Khan et al., 2020). La investigación de (Fares et al., 2022) muestra cómo un convertidor multipuerto puede gestionar este equipo: la batería se encarga del suministro constante de energía, mientras que los supercapacitores actúan como refuerzos para los momentos de mayor demanda. Esto no solo mejora el rendimiento en misiones exigentes, sino que también protege la batería, haciéndola durar más (Kingry et al., 2018).

Estos sistemas híbridos resultan especialmente útiles en aplicaciones como la pulverización agrícola, donde el UAV debe cargar peso extra y despegar frecuentemente (Xu et al., 2022). Incluso en MAVs se usan baterías LiPo muy pequeñas, pero con una capacidad de descarga extrema, priorizando la potencia inmediata sobre la duración (Abidali et al., 2024), en un claro ejemplo de cómo el diseño de la batería se adapta a las limitaciones de cada plataforma.

3.4 Balance entre potencia generada y consumida durante distintas fases de vuelo

El éxito de un UAV solar depende de un simple pero crucial equilibrio: debe generar más energía de la que consume. En este aspecto, los UAVs de ala fija parten con gran ventaja. Una vez que alcanzan su velocidad de crucero, su consumo energético se reduce drásticamente hasta niveles tan bajos como los 43 W reportados en (Morton et al., 2015). Lo interesante es que, bajo un sol intenso, sus amplias alas pueden generar más energía de la que necesitan para volar, el mismo estudio reporta hasta 146.7 W de generación solar. Este superávit energético no solo les permite volar durante horas, sino que incluso pueden cargar sus baterías en pleno vuelo, abriendo la posibilidad a misiones que duran días completos.

La situación es radicalmente opuesta para los cuadricópteros. Mantenerse en el aire exige un consumo energético constante y elevado, ya que los rotores deben luchar continuamente contra la gravedad, se han reportado consumos que oscilan entre 184 W (Kingry et al., 2018) y 360 W (Goh et al., 2019) solo para mantener el vuelo estable. Estas cifras son tan altas que, como señala (Elouarouar and Medromi, 2022), los paneles solares en multirrotores rara vez pueden generar suficiente energía para cubrir el consumo en tiempo real.

Sin embargo, esto no significa que la energía solar sea inútil en los cuadricópteros. Su verdadero valor está en extender la vida de la batería. Como ejemplo, en (Elagib and Karaarslan, 2023) se mostró que la asistencia solar podía aumentar la autonomía de un cuadricóptero de 34 min a más de 2 h, no porque volara solo con el sol, sino porque la carga solar compensaba parte del consumo, haciendo que la batería se agotara más lentamente.

Esta diferencia fundamental explica por qué los UAVs de ala fija pueden aspirar a vuelos perpetuos en condiciones ideales, mientras que los cuadricópteros solares deben conformarse con extender significativamente su autonomía. El diseño de ala fija convierte la energía solar en libertad de vuelo; el cuadricóptero la convierte en tiempo adicional en el aire.

4. REVISIÓN DE UAVs SOLARES DE ALA FIJA Y CUADRICÓPTEROS

La elección entre un UAV cuadricóptero y uno de ala fija con capacidades solares no es una decisión arbitraria, sino que depende directamente de los objetivos específicos de la misión. Cada arquitectura presenta ventajas operativas distintas que las hacen ideales para escenarios diferentes. Mientras que los cuadricópteros sobresalen en misiones que requieren precisión, vuelo estacionario y operaciones en espacios reducidos, los UAVs de ala fija son superiores para aplicaciones que necesitan cubrir grandes distancias y mantener una presencia aérea prolongada.

Esta selección implica necesariamente evaluar compromisos: la arquitectura de ala fija se consolida como la solución preferente para aplicaciones que priorizan la autonomía y el alcance, mientras que la configuración de cuadricóptero resulta indispensable cuando la misión demanda precisión, capacidad de suspensión en el aire y operaciones de VTOL en áreas restringidas.

A continuación, se presenta la Tabla 1 con la recopilación de las características más importantes de los UAVs de ala fija y cuadricópteros.

Tabla 1. Comparativa técnica de UAVs solares según arquitectura

Ref.	Arquitectura del UAV	Peso del UAV (kg)	Celdas solares	Voltaje del arreglo FV (V)	Potencia requerida (W)	Potencia generada (W)	Tiempo de vuelo
(Kranjec et al., 2018)	Ala fija	1.074	SunPower C60	16	≈20	15	Pruebas de 15 min
(Sener et al., 2019)	Ala fija	≈3	SunPower C60	28	250	≈150	Simulación, sin pruebas reales
(Danjuma et al., 2021)	Ala fija	3	Monocristalinas Maxeon Gen III	≈18.6	10.92–19.47	19.47	30 horas
(Chu et al., 2021)	Ala fija	1.88	SunPower C60	≈11	40–49	≈40.68	Pruebas de 6–7.5 min
(Li, 2021)	Ala fija	1.3	SunPower C60	0.59 V por celda	≈8.5	≈ 18.8	Hasta 2.5 horas en sol pleno
(Sahwee et al., 2023)	Ala fija	1.685	Monocristalinas de 3.6 V, 20 pzs	11.84	70–100	61.56	Hasta 5.3 h en sol pleno
(Morton et al., 2015)	Ala fija	3.155	SunPower C60	25.2	43–47	146.7	No se completó vuelo continuo
(Kingry et al., 2018)	Cuadricóptero	8.175	SunPower C60	25.3	≈644	293.9	≈1 h
(Goh et al., 2019)	Cuadricóptero	2.6	SunPower C60	16.8	360	360	1 min 38 s
(Bahuguna et al., 2020)	Cuadricóptero	1.5	6 V, 100 mA	≈18	-	-	4.5 minutos (sin sistema solar)
(Xu et al., 2022)	Cuadricóptero	2.25	Película delgada de silicio amorfo, 15.4 V, 50 mA	≈19	-	-	8 minutos
(Elagib and Karaarslan, 2023)	Cuadricóptero	1.147	SunPower C60	≈18	≈150	≈100	2.18 h
(Abidali et al., 2024)	Cuadricóptero	0.07151	SunPower C60	2.33	≈12	1.65, máx. panel solar	3.5 min

Al observar los datos de la Tabla 1, las diferencias de rendimiento entre ambas arquitecturas se vuelven claras y explican por qué cada una domina en escenarios distintos.

Los UAVs de ala fija demuestran una gran ventaja en autonomía. Mientras que la mayoría de los cuadricópteros listados logran minutos de vuelo (desde 1.6 minutos hasta un máximo de 2.18 horas (Elagib and Karaarslan, 2023)), las alas fijas fácilmente alcanzan horas. Por ejemplo, en (Danjuma et al., 2021) se reportan 30 horas de vuelo, y el prototipo presentado en (Li, 2021) alcanza 2.5 horas.

La diferencia clave radica en la gestión energética. Los UAVs de ala fija pueden volar durante muchas horas debido a que sus alas grandes permiten instalar paneles solares extensos, logrando generar más potencia de la que requiere el sistema. Por el contrario, los multirrotores generalmente logran solo minutos de autonomía, aun cuando son capaces de generar más potencia que un UAV de ala fija, esto debido a su alto consumo energético para mantenerse en el aire y su espacio limitado para paneles, ya que el peso aumenta más rápidamente que el área disponible para paneles al escalar el diseño. Como ejemplo, se observa que el cuadricóptero presentado en (Kingry et al., 2018) requiere ≈644 W solo para mantenerse en el aire, lo que implica un consumo elevado. En cambio, El UAV de ala fija presentado en (Morton et al., 2015) consume entre 43 y 47 W en total durante el vuelo nivelado, una fracción de lo que necesita un cuadricóptero.

El peso también juega un papel muy importante al comparar estas arquitecturas de UAVs. Aunque existen cuadricópteros muy ligeros, como el "Micro Solarcopter" de apenas 71 gramos (Abidali et al., 2024), su tiempo de vuelo es de solo 3.5 minutos. Esto resalta un desafío fundamental para los multirrotores: cualquier gramo adicional de peso, ya sea por paneles solares o una batería más grande, requiere una potencia inmediatamente mayor para mantener el vuelo, creando un ciclo difícil de optimizar. Por el contrario, los UAVs de ala fija, con pesos que suelen oscilar entre 1 y 3 kg, pueden acomodar paneles solares más grandes sin penalizar tan severamente su eficiencia, ya que la sustentación proviene principalmente de la aerodinámica del ala y no directamente del empuje del motor.

Esta ventaja estructural se refleja en el balance energético. El UAV presentado en (Morton et al., 2015) que consumía 47 W, generaba 146.7 W con sus paneles solares, logrando un superávit que, teóricamente, permite vuelos prolongados bajo el sol, aunque no se puso a prueba. Para los cuadricópteros, este escenario es mucho más difícil. El prototipo totalmente alimentado con energía solar presentado en (Goh et al., 2019), lograba generar 360 W bajo condiciones de irradiancia solar ideales, y tomando en cuenta que la potencia necesaria para el vuelo es de 360 W, apenas se logró un vuelo controlado de poco más de un minuto y medio, debido a que cualquier mínima variación en la irradiancia solar hacía que la potencia generada fuera inferior a la requerida, demostrando que igualar el alto consumo de potencia en tiempo real, sin baterías, es un reto enorme. Por ello, en la mayoría de los cuadricópteros, la función principal de los paneles solares no es alimentar el vuelo directamente, sino extender la vida de la batería.

En cuanto a componentes, ambas arquitecturas utilizan celdas SunPower por su alta eficiencia, pero difieren en su propulsión: los UAVs de ala fija emplean motores de baja velocidad optimizados para eficiencia, mientras que los cuadricópteros requieren motores de alto rendimiento para mayor agilidad.

5. CONCLUSIÓN

El análisis realizado demuestra que la elección entre un UAV solar de ala fija y un cuadricóptero depende fundamentalmente del tipo de misión que se necesite ejecutar. Cada arquitectura ofrece ventajas específicas que las hacen más adecuadas para diferentes escenarios operativos. Los UAVs de ala fija representan la solución ideal cuando los requisitos principales son la máxima autonomía y la capacidad de cubrir grandes extensiones. Su diseño aerodinámico eficiente, combinado con la amplia superficie alar disponible para instalar paneles solares, les permite lograr vuelos de larga duración. Esto los hace particularmente útiles para aplicaciones como la vigilancia ambiental a gran escala o el monitoreo agrícola extensivo (Morton et al., 2015, Li, 2021).

Por su parte, los UAVs cuadricópteros encuentran su principal ventaja en misiones donde la versatilidad operativa es crucial. Su capacidad de VTOL, junto con la posibilidad de mantenerse estáticos en un punto, los hace indispensables para tareas que requieren precisión, como la inspección cercana de infraestructuras, operaciones de búsqueda y rescate en entornos complejos, o aplicaciones agrícolas de precisión (Kingry et al., 2018, Goh et al., 2019, Abidali et al., 2024). Aunque su autonomía es limitada debido al alto consumo energético que requiere el vuelo estacionario y al espacio reducido para celdas solares, la integración de tecnología FV resulta valiosa para extender la duración de las baterías entre ciclos de carga (Elouarouar and Medromi, 2022).

Además, los avances en electrónica de potencia con convertidores multipuerto (Fares et al., 2022) y gestión energética con algoritmos de red neuronal para MPPT (Danjuma et al., 2021), la inteligencia aplicada a la gestión de la energía solar y de las baterías está ayudando a maximizar la autonomía tanto en alas fijas como en cuadricópteros.

Incluso en aplicaciones especializadas como la fumigación agrícola (Xu et al., 2022) o el monitoreo ambiental con MAVs (Abidali et al., 2024), la integración solar está demostrando su valor práctico para extender las capacidades operativas de estos sistemas. Estos desarrollos tecnológicos, combinados con metodologías de diseño más accesibles como el presentado en (da Silva and Pacheco, 2021), están haciendo que los UAVs solares sean una opción cada vez más viable para un espectro más amplio de aplicaciones civiles y comerciales.

En conclusión, la decisión no se basa en qué arquitectura es superior en términos absolutos, sino en cuál se adapta mejor a los requisitos técnicos específicos de cada misión. El diseño de ala fija es sinónimo de resistencia y alcance, mientras que el cuadricóptero representa precisión y flexibilidad. El desarrollo futuro de plataformas más eficientes dependerá de avances en tres áreas clave: la mejora en la densidad energética de las baterías, el aumento de la eficiencia de los paneles solares, y la exploración de configuraciones híbridas que puedan combinar las ventajas de ambos diseños para aplicaciones más versátiles.

REFERENCIAS

Abidali, A., Agha, S., Munjiza, A. and Shaheed, M. 2024. Development of a solar powered multirotor micro aerial vehicle. *Scientific Reports,* 14.

Bahuguna, R., Sharma, R., Biswas, S. and P., N. 2020. Design and Analysis of Solar Quadcopter. *Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research)*.

Chu, Y., Ho, C., Lee, Y. and Li, B. 2021. Development of a solar-powered unmanned aerial vehicle for extended flight endurance. *Drones,* 5**,** 44.

da Silva, J. R. and Pacheco, G. M. 2021. An Extended Methodology for Sizing Solar Unmanned Aerial Vehicles: Theory and Development of a Python Framework for Design Assist. *Sensors* [Online], 21.

Danjuma, S. B., Omar, Z. and Abdullah, M. N. 2021. Design of Power Device Sizing and Integration for Solar-Powered Aircraft Application. *Journal of Mechanical Engineering,* 18**,** 215-232.

Elagib, R. and Karaarslan, A. 2023. Modeling and Simulation of a Solar-Powered Quadcopter Using MATLAB.

Elouarouar, S. and Medromi, H. 2022. Multi-Rotors Unmanned Aerial Vehicles Power Supply and Energy Management. *E3S Web Conf.,* 336.

Fares, A. M., Klumpner, C. and Sumner, M. 2022. A Novel Multiport DC-DC Converter for Enhancing the Design and Performance of Battery–Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Unmanned Aerial Vehicles. *Applied Sciences,* 12**,** 2767-2767.

Goh, C. S., Kuan, J. R., Yeo, J. H., Teo, B. S. and Danner, A. 2019. A fully solar-powered quadcopter able to achieve controlled flight out of the ground effect. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications,* 27**,** 869-878.

Khan, M., Khan, A., Ahmad, M., Saleem, S., Aziz, M. S., Hussain, S. E. and Khan, F. M. 2020. A Study on Flight Time Enhancement of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Using Supercapacitor-Based Hybrid Electric Propulsion System (HEPS). *Arabian Journal for Science and Engineering,* 46**,** 1179-1198.

Kingry, N., Towers, L., Liu, Y.-C., Zu, Y., Staheli, B., Katagiri, Y., Cook, S. and Dai, R. 2018. *Design, Modeling and Control of a Solar-Powered Quadcopter*.

Kranjec, B., Sladić, S., Giernacki, W. and Bulić, N. 2018. PV System Design and Flight Efficiency Considerations for Fixed-Wing Radio-Controlled Aircraft—A Case Study. *Energies,* 11**,** 1-12.

Li, Z. 2021. Prototype of a Solar-powered Fix-winged Unmanned Aerial Vehicle. *Journal of Physics: Conference Series,* 2029**,** 012016.

Morton, S., Sa, R. D. and Papanikolopoulos, N. Solar powered UAV: Design and experiments. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 28 Sept.-2 Oct. 2015 2015. 2460-2466.

Rahman, K. S., Rokonuzzaman, M., Xue, G. B., Thakur, R. I., Kabir, K. M., Matin, M. A., Tiong, S. K. and Amin, N. 2019. A Light Weight Solar Powered Mini Quadcopter for Environmental Monitoring. *International Journal of Engineering and Advanced Technology,* 9**,** 4190-4194.

Sahwee, Z., Kamal, N. L. M., Norhashim, N., Shah, S. A. and Hamid, S. A. From Concept to Flight: Developing a Hybrid Solar-Powered UAV Prototype for Malaysian Skies. 2023 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST), 7-9 June 2023 2023. 01-06.

Sener, E., Turk, I., Yazar, I. and Karakoç, T. H. 2019. Solar powered UAV model on MATLAB/Simulink using incremental conductance MPPT technique. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology,* 92**,** 93-100.

Xu, Y., Dan, Y. and Raymond, M. T. 2022. Production of Solar-powered Quad-copter for Agricultural Field Spraying. *Journal of Physics: Conference Series,* 2383**,** 012036.

Ying, X., Qianfeng, W., Mwanza Taipa, R., Gang, L. and Xianghu, Z. 2019. Design of Solar Powered and Fatigue Durable Quadcopter. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications,* 7**,** 58-65.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Study and evaluation of a reaction chamber for heat treatments of semiconductor materials by electromagnetic induction.

Jimenez-Bernal, Emmanuel* Mastache-Mastache, Jorge Edmundo* López-Ramírez, Roberto* Soriano-Vargas, Orlando*

** Tecnológico Nacional de México - Tecnológico de Estúdios Superiores de Jocotitlán, Boulder, Carretera Toluca-Atlacomulco KM 44.8 Ejido de San Juan y, San Agustín, 50700 Cdad. de Jocotitlán, Méx. (e-mail: jorge.mastache@tesjo.edu.mx).*

Abstract: This work analyzes the thermal behavior of an induction furnace equipped with a reaction chamber for the treatment of metal oxides in semiconductor materials. Seven coil positions and two atmospheric conditions (with and without air) were characterized to evaluate heating and cooling dynamics. Results exhibit first-order behavior with higher thermal efficiency in the absence of air and a marked dependence of peak temperature on position. The central zone provides greater stability and repeatability, suitable for controlled oxidation and annealing processes.

Keywords: Camera, induction, temperature, materials, semiconductors.

1. INTRODUCTION

El tratamiento térmico de materiales y su obtención en laboratorios controlados actualmente se encuentran condicionados en la energía sometida para modificar o condicionar su estructura cristalina, conducción eléctrica o morfología, esta puede ser suministrada de tipo electromagnético, mecánico o térmico (Shen, 2025).

Antes de la implementación de los hornos de inducción electromagnética (H. D., 2022), el calentamiento de materiales se realizaba mediante tecnologías como los hornos de resistencia, hornos de flama o de arco eléctrico. (Hernández–Rojas, 2024)

Los hornos de inducción permiten generar calor por medio de inducción electromagnética la cual es una forma para suministrar energía en forma de calor para tratamientos de materiales, su funcionamiento se basa en la generación de un campo magnético alterno mediante bobinas de geometría circular en espiral (Mendi-Altube, 2024), que rodean a una cámara de reacción, esta cámara actúa como el espacio confinado en el cual se introduce una chapa metálica y el material a tratar dentro de un tubo de cuarzo, para lograr la transferencia de energía con respecto a la zona de incidencia en el horno (Yin, 2022).

La cámara de reacción se encuentra envuelta por la bobina de inducción de espiras aisladas, las cuales son las encargadas de producir un campo electromagnético variable (Shen, 2025), al colocar materiales como lo son los metales, estos producen óxidos metálicos.

La geometría de las bobinas y la posición del material tienen un patrón de calentamiento, ya que influye directamente en la temperatura y demanda de potencia del proceso, la bobina puede adaptarse para calentar distintos tipos de óxidos metálicos los cuales para esta aplicación se utilizaron como materiales semiconductores y debe basarse en las necesidades térmicas de cada aplicación, de tal forma que el calor que se distribuye dentro de la cámara modifica estructuralmente las condiciones de los materiales a tratar (Kuranova, 2022).

Es por esto que la caracterización térmica de las cámaras de reacción según la orientación y posición de una muestra provoca la homogeneidad y la repetitividad de los muestreos, lo cual es clave para el diseño de experimentos y asegurar las propiedades físicas y químicas en toda la estructura del material a tratar (Zhao, 2019). Por otro lado, si la muestra se coloca más cerca de los extremos o en zonas laterales de las bobinas, la intensidad del campo disminuye, provocando un calentamiento desigual, obligando a la caracterización de la zona plana del horno.

1.1 Hornos de Inducción electromagnética para el tratamiento en materiales.

Un sistema de calentamiento por inducción consta de varios elementos clave: la bobina de inducción, encargada de generar el campo magnético; la fuente de alimentación, que suministra la potencia a la bobina; una etapa de acoplamiento magnético-térmico que adapta la energía hacia la carga, generalmente una chapa metálica, para transmitirla en forma de calor a la muestra; un sistema de enfriamiento destinado a evitar el sobrecalentamiento del equipo; y finalmente, el material o muestra que se desea calentar.

El horno de inducción es un dispositivo electrónico en el que el calor es generado por calentamiento por la inducción electromagnética de un medio conductivo (un metal) en un crisol o cámara de cuarzo para generar calor directamente en un material conductor como se muestra en la Figura 1. (Indutecsa, 2018).

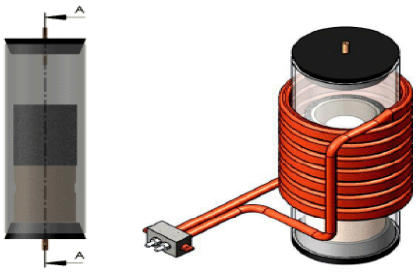


Figura 1. Prototipo de cámara o reactor de medición y bobina

El calentamiento por inducción es un método muy utilizado para el tratamiento de materiales semiconductores ya que produce densidades de alta potencia y tiempos de interacción cortos, lo que permite tratar muestras de estos materiales con propiedades variables (Toledano, 2021) este proceso se realiza en la cámara de reacción lo cual es el espacio dentro del horno donde se pueden llevar a cabo reacciones químicas controladas, especialmente aquellas que involucran gases a alta temperatura. (Mesurex, 2018)

Los hornos de inducción son ampliamente utilizados en procesos como el endurecimiento superficial, el revenido, la soldadura fuerte o blanda, y muy especialmente en el tratamiento de semiconductores, en este último campo, se utilizan técnicas como el recocido, la oxidación térmica y la activación de dopantes los cuales requieren un control extremadamente preciso de la temperatura, algo que estos hornos pueden ofrecer gracias al sistema de control de la fuente de potencia. (Alsimet, 2021)

Durante la oxidación a alta temperatura, se expone un semiconductor a oxígeno controlado, generando una fina capa de óxido superficial que mejora sus propiedades aislantes y térmicas. Asimismo, mediante el accionamiento térmico, es posible promover la difusión de átomos dopantes en el interior del semiconductor, mejorando su conductividad. (Kanthal, 2024)

En el proceso de recocido, el material se calienta a una temperatura determinada, se mantiene durante un tiempo específico y luego se enfría gradualmente. Este procedimiento permite modificar la estructura cristalina del material, aliviando tensiones internas y optimizando sus propiedades eléctricas y mecánicas, tengamos en cuenta el tiempo y la velocidad del calentamiento/enfriamiento porque son cruciales, ya que variaciones bruscas pueden provocar deformaciones o fracturas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se desarrolló en el Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, en conjunto con el Sistema mecatrónico para la obtención de materiales semiconductores basado en tratamientos térmicos por inducción electromagnética.

El sistema consiste en una fuente de alimentación basada en un circuito inversor resonante de tipo conmutación por voltaje cero ZVS, monofásico para la aplicación el sistema de inducción partiendo de la alimentación voltaje AC acoplando un transformador con una salida con devanado central de 16/32 V y un amperaje de 20 A, la presencia de una elevada corriente sobre la bobina de inducción es importante para la producción del tratamiento térmico, esto se debe a que está ligado íntimamente el número de vueltas con la corriente de demanda en la bobina, al incrementarse, el campo magnético también se incrementa la corriente. Posteriormente continúa la parte de la rectificación de onda completa por medio del puente rectificador de 160 A y una zona de filtrado por medio de un banco de capacitores, como se muestra en la figura 2.

El sistema de inducción al cual se le pretende aplicar este inversor resonante utilizara muestras de 2 x 1 cm que se contendrán dentro de un tubo de cuarzo de media pulgada, por lo tanto, de acuerdo a los requerimientos y consideraciones respecto a la temperatura y amperaje que estarán influyendo en la bobina de inducción, se propone su construcción de la bobina de inducción con tubo de cobre de 0.93 cm de diámetro, permitiendo un flujo de refrigerante líquido al interior de la bobina. De acuerdo a la construcción y material utilizado en la bobina de inducción, su valor de inductancia puede variar respecto a la carga o el material a tratar, por lo que se propone utilizar una inductancia de 2.9 uH, y un capacitor resonante de 3.3 uF

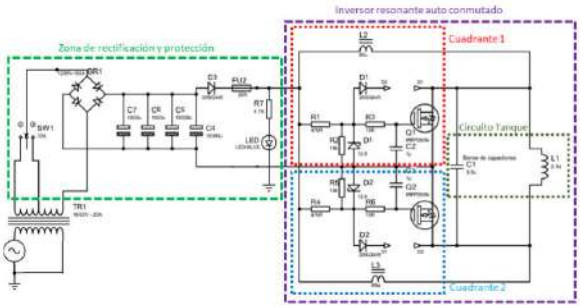


Figura 2. Circuito inversor resonante completo

El horno de inducción electromagnética se acondicionó una cámara de reacción con sistema de medición de gases, en la cual se colocan las muestras a tratar. Esta cámara permite realizar procesos de oxidación mediante inducción electromagnética generada por las bobinas integradas en el sistema como se muestra en la figura 3 en un diseño en el software SOLIDWORKS.Este equipo es ideal para el tratamiento de materiales semiconductores basados en óxidos metálicos, ya que permite alcanzar temperaturas controladas en un rango de 500 °C a 550 °C. Además, cuenta con un panel de control que permite monitorear la temperatura.

La cámara de medición está equipada con un soporte de aluminio diseñado específicamente para sostener el tubo de cuarzo, el cual se encuentra asegurado por medio de dos tapas herméticas. Una de estas tapas incorpora un termopar tipo K, que actúa como sensor de temperatura y permite monitorear el proceso térmico. Este sistema, en conjunto con las bobinas de inducción del horno, posibilita la realización del tratamiento de oxidación sobre materiales semiconductores, asegurando una distribución uniforme del calor.

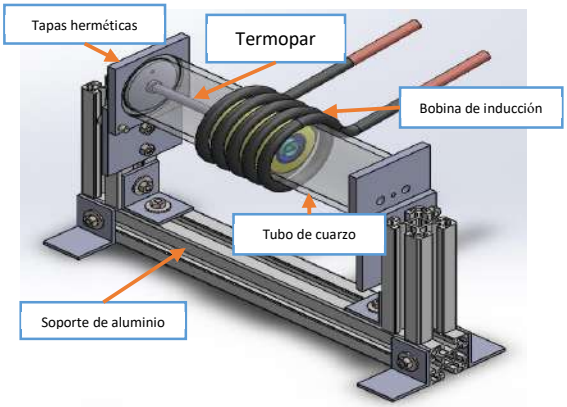


Figura 3. Diseño de la cámara de medición

El sistema cuenta con cinco espiras de una bobina de cobre distribuidas alrededor de la estructura para generar el campo electromagnético necesario en el proceso de oxidación como se muestra en la figura 4. Su posición influye en la distribución del calor: las bobinas cercanas al termopar tipo K (posiciones 2 y 4) alcanzan temperaturas más altas con mayor rapidez, mientras que las más alejadas (posiciones 3 y 5) se calientan más lentamente. La bobina central (posición 1) es íntimamente ligada a la zona plana del reactor para colocar el instrumento de medición de temperatura, ya que permite un control térmico más estable, dentro del rango de calentamiento de la cámara, en este trabajo se evaluaron estas posiciones y el control de temperatura en las diferentes secciones de la bobina de inducción.

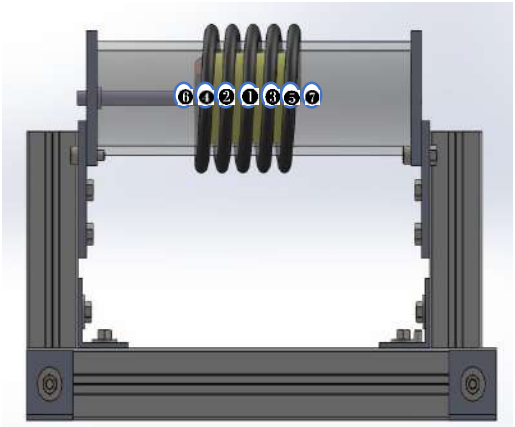


Figura 4. Posición de las bobinas

La cámara de medición incorpora un tubo de cuarzo en cuyo interior se encuentra un soporte de vidrio refractario, diseñado para conservar el calor generado por el como se muestra en la figura 5. Dentro de este soporte se aloja un tubo de acero inoxidable, y en su interior se encuentra un tubo de vidrio que funciona como porta muestra, donde se coloca el material a tratar.

Esta estructura multicapa cumple una función térmica fundamental: permite conservar el calor generado por las bobinas de inducción sobre la chapa metálica. Además, ayuda a proteger el tubo de cuarzo ante posibles choques térmicos, reduciendo el riesgo de fracturas causadas por las altas temperaturas del proceso, esto es esencial para garantizar la eficiencia del tratamiento por inducción electromagnética y asegurar un proceso de oxidación controlado y seguro.

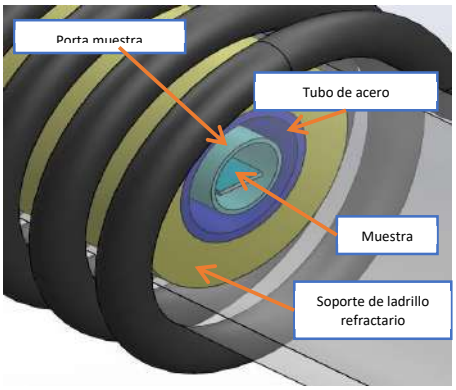


Figura 5. Sección interna cámara y soporte de la muestra

3. RESULTADOS

El horno está constituido por un tubo de cuarzo de 25 cm de largo, 0.5 cm de espesor y un diámetro interior de 4.95 cm, cuenta con tapas herméticas y en una de ellas se fija un termopar tipo K de 10 cm de largo, encargado de medir las temperaturas alcanzadas durante las pruebas. Dentro del tubo de cuarzo se introduce un ladrillo refractario de 6.55 cm de largo y 1.5 cm de espesor, con un diámetro interior de 1.9 cm y un diámetro exterior de 4.07 cm, dentro de este ladrillo se coloca un tubo de acero de 5.7 cm de longitud y 0.3 cm de espesor y finalmente, dentro del tubo de acero se inserta un porta muestra que es un tubo de vidrio delgado de 4.5 cm de longitud, donde se posicionan las muestras que serán sometidas a análisis térmico como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Reactor y fuente de inducción.

Las pruebas de comportamiento se hicieron colocando el termopar tipo K en la distancia en las cinco espiras de la bobina de cobre, cada una de 1.5 cm de ancho, separadas entre sí por 0.5 cm. La bobina central se denomina prueba 1, y a partir de ella se numeran hacia los costados pruebas 2 y 3 a la izquierda y derecha respectivamente, luego 4 y 5 que son las pruebas más siguientes, para complementar las pruebas, se realizaron dos mediciones adicionales fuera del área de donde están las bobinas a los costados resultando en un total de siete posiciones de prueba.

3.1 Casos de Aplicación 1 zona plana

En las gráficas a y b de la figura 7, se muestra el incremento de temperatura de la prueba 1 en la cámara de medición del horno de inducción, se midio la temperatura con un multímetro digital, se realizó una prueba con aire alcanzando una temperatura de 545°C, y otra sin aire alcanzando la temperatura de 565°C en un tiempo aproximado de 15 min ambas pruebas. Se calculó el cambio de temperatura al 63% (0.63 el valor de la referencia) respecto a la constante de tiempo, obteniendo 343.35°C en la temperatura maxima de 545°C (prueba con aire) y 355.95°C en la temperatura máxima de 565°C (prueba sin aire), se concluye que el incremento de temperatura con y sin aire va incrementando de manera síncrona sin importar el factor de aire, hasta llegar a punto de cruce con temperatura de 385°C en un tiempo de 02:04 minutos, a partir de ahí surgen los cambios de temperaturas en cada prueba.

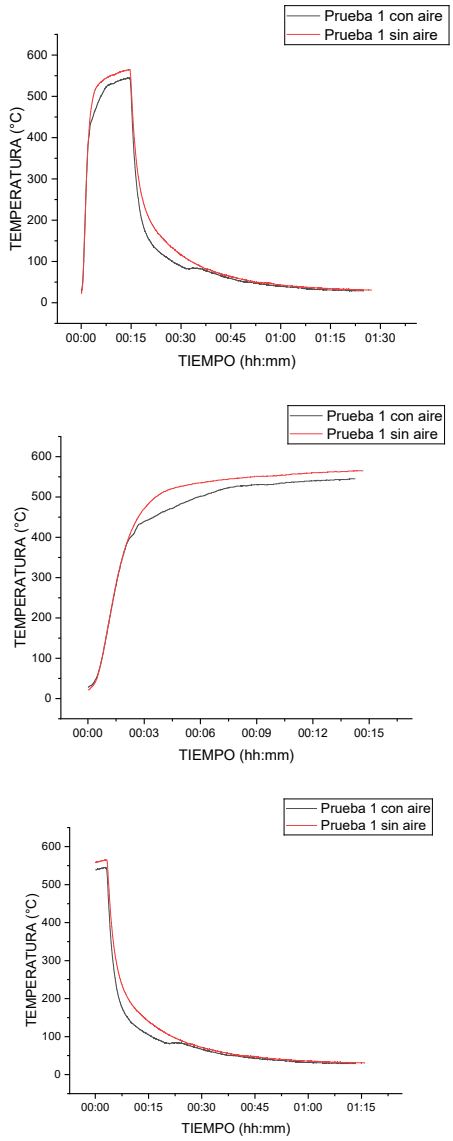


Figura 7. Graficas de temperatura Casos de Aplicación 1 zona plana

Esto demuestra un comportamiento térmico de primer orden bien definido y con una dinámica de calentamiento similar en las dos atmósferas hasta el punto de cruce de 385 °C, a partir del cual las curvas divergen por efecto de la convección

3.2 Resultados de las siete zonas de la cámara de reacción

Se realizaron las siete pruebas con intervención de aire como se muestra en la tabla 1 y posteriormente siete pruebas sin aire vea tabla 2, moviendo la zona de incidencia del horno en cada caso para posicionar el termopar tipo K exactamente en el punto de interés.

En cada prueba se registraron los siguientes datos:

- Temperatura máxima alcanzada.
- Tiempo de subida (desde el encendido del horno hasta alcanzar la temperatura máxima, aproximadamente en 15 minutos).
- Temperatura alcanzada al 63% de la subida, representando el parámetro τ, (τ = 0.63 Vref), lo cual es importante para modelar el comportamiento térmico en un sistema de primer orden.
- Tiempo en alcanzar el 63% mencionado.
- Tiempo de bajada (desde la temperatura máxima hasta una temperatura ambiente) con enfriamiento natural.

Tabla 1 Resultado de pruebas con aire

	Temperatura máxima	*Tiempo de subida*	*Temperatura (τ) 0.63v*	*Tiempo alcanzado (τ)*	*Tiempo de bajada*
1	545°C	00:12:00 hh:mm:ss	343.35 °C	00:01:00 hh:mm:ss	01:31:00 hh:mm:ss
2	552°C	00:14.00 hh:mm:ss	347.76 °C	00:02:41 hh:mm:ss	01:21:50 hh:mm:ss
3	471°C	00:12:00 hh:mm:ss	296.76 °C	00:02:00 hh:mm:ss	01:15:30 hh:mm:ss
4	454°C	00:14:21 hh:mm:ss	286.02 °C	00:02:00 hh:mm:ss	01:09:40 hh:mm:ss
5	417°C	00:14:27 hh:mm:ss	262.71 °C	00:02.00 hh:mm:ss	00:55:47 hh:mm:ss
6	220°C	00:14.33 hh:mm:ss	138.6 °C	00:01:00 hh:mm:ss	00:58:42 hh:mm:ss
7	271°C	12:00:15 hh:mm:ss	170.73 °C	00:03:00 hh:mm:ss	00:58:23 hh:mm:ss

Tabla 2. Resultado de pruebas sin aire

	Temperatura máxima	*Tiempo de subida*	*Temperatura (τ) 0.63v*	*Tiempo alcanzado (τ)*	*Tiempo de bajada*
1	565°C	00:14:41 hh:mm:ss	355.95 °C	00:01:52 hh:mm:ss	01:15:50 hh:mm:ss
2	536°C	00:15:30 hh:mm:ss	337.68 °C	00:01:56 hh:mm:ss	01:13:30 hh:mm:ss
3	575°C	00:14:30 hh:mm:ss	362.25 °C	00:01:46 hh:mm:ss	01:20:35 hh:mm:ss
4	392°C	00:14:30 hh:mm:ss	254.8 °C	00:02:17 hh:mm:ss	01:07:60 hh:mm:ss
5	454°C	00:14:25 hh:mm:ss	286.02 °C	00:01:54 hh:mm:ss	01:08:50 hh:mm:ss
6	179°C	00:14:25 hh:mm:ss	112.77 °C	00:01:42 hh:mm:ss	00:51:30 hh:mm:ss
7	355°C	00:14:32 hh:mm:ss	223.65 °C	00:02:02 hh:mm:ss	01:28.00 hh:mm:ss

Con los datos recolectados se realizaron gráficas de comportamiento donde se observa:

- Graficas completas de todos los valores obtenidos desde el encendido del horno hasta llegar a su temperatura ambiente.

- Gráficas del asmidio de temperatura desde el encendido del horno hasta alcanzar la temperatura máxima en un lapso de 15 minutos, considerando el enfriado natural.

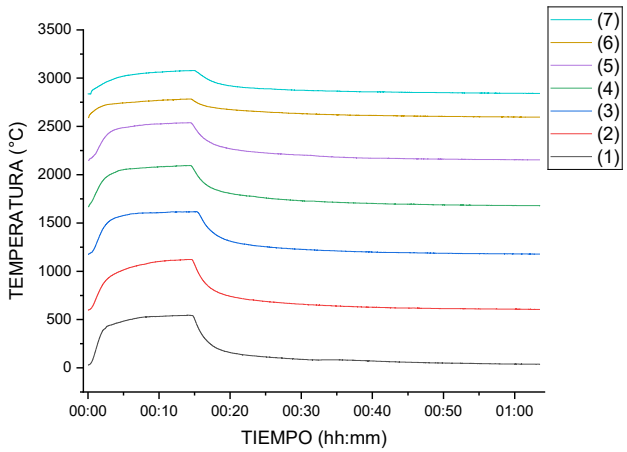


Figura 8. Pruebas totales con aire

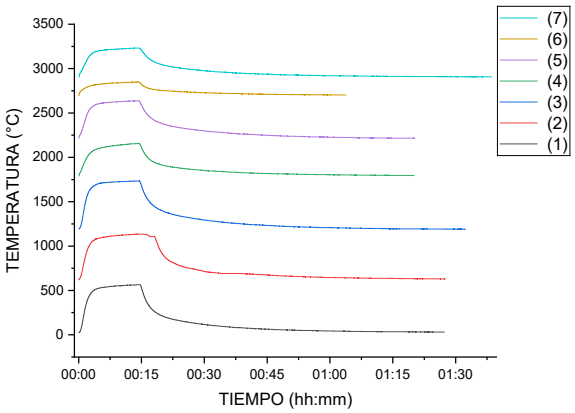


Figura 9. Pruebas totales sin aire

En zonas laterales y periféricas (pruebas 2–7) se observó una disminución progresiva de la temperatura máxima y un aumento de los tiempos de enfriamiento. En condiciones con aire, la prueba 5 alcanzó solo 417 °C y la prueba 6 apenas 220 °C, evidenciando una fuerte dependencia de la posición respecto a la bobina central. De forma similar, en pruebas sin aire, la temperatura máxima varió desde 575 °C en la posición 3 hasta 179 °C en la posición 6, confirmando que la geometría de la bobina y la distancia al sensor de temperatura se determina la eficiencia térmica. Además, los tiempos de bajada fueron significativamente mayores en las pruebas periféricas (más de 50 minutos), indicando un enfriamiento más lento debido a menor intercambio térmico convectivo y acumulación de calor en zonas menos expuesta

La ausencia de aire produjo en general mayores temperaturas máximas y una dinámica térmica más homogénea en las zonas centrales y medias, debido a la reducción de pérdidas por convección y a la predominancia de mecanismos de conducción y radiación. Las curvas térmicas mostraron perfiles suaves y reproducibles, lo cual es crucial para modelar la cámara como un sistema térmico de primer orden. Este comportamiento es adecuado para tratamientos de oxidación controlada y recocido de materiales semiconductores, donde la estabilidad térmica y la repetitividad de las condiciones son esenciales para garantizar homogeneidad cristalina

3.3 Aplicación a Óxido Metálico ZnO

El óxido de zinc (ZnO) es considerado un material semiconductor tipo n que tiene una banda prohibida de 3.37 eV, utilizado para aplicaciones fotoeléctricas, optoelectrónicas y luminiscentes

Para la obtención de este material se realizó una evaporación térmica de virutas de zinc metálico 0.12 g dentro de un horno resistivo tubular: Donde se precalentó el horno resistivo hasta alcanzar la temperatura a 850° C. Una vez realizado esto, el siguiente paso fue saturar la cámara con un gas de arrastre inerte de flujo de argón a 1000 sccm por el extremo izquierdo del tubo de cuarzo, y se introdujo cuidadosamente el tubo de cuarzo dentro del horno para conducir el material evaporado a

una zona de baja temperatura. Una vez dentro el tubo de cuarzo en el horno, con ayuda de pinzas de laboratorio se colocó un sustrato de vidrio a 21 cm del centro del horno en la zona plana del horno (donde se colocó la canaleta de cuarzo) en el extremo derecho del tubo, se coloca una tapa con el fin de crear una cámara de reacción, a partir de este momento se deja evaporar durante 30 minutos. Posteriormente se oxidaron las muestras de zinc metálico evaporado en atmosfera de aire durante dos horas con un flujo de aire de 1000 sccm por dos técnicas de oxidación, por horno resistivo e inducción electromagnética, se caracterizó la cristalinidad de los óxidos a través de la técnica de difracción de rayos X con el equipo Difractómetro de rayos X Bruker D8.

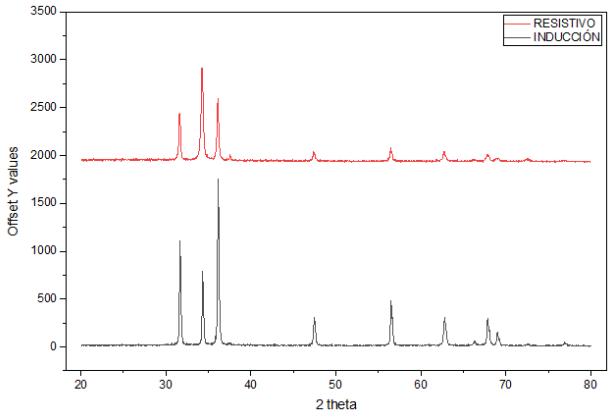


Figura 10. Comparativa de análisis de cristalinidad con Difractogramas de Rayos X

Los difractogramas obtenidos para las muestras de óxido de zinc sintetizadas mediante calentamiento resistivo e inducción muestran que, en ambos casos, se formó la fase wurtzita hexagonal característica del ZnO, evidenciada por la presencia de los picos ubicados aproximadamente en 31.7°, 34.4°, 36.2°, 47.5°, 56.6°, 62.8° y 67.9° en 2θ, sin indicios de fases secundarias asociadas a hidróxidos, zinc metálico u otros compuestos. Sin embargo, al comparar ambas técnicas es evidente que la muestra obtenida por inducción presenta picos más estrechos y de mayor intensidad, lo cual indica un mayor grado de cristalinidad y un tamaño de cristalita superior en comparación con la síntesis resistiva. Este comportamiento puede atribuirse a la mayor homogeneidad y eficiencia térmica del calentamiento por inducción, que favorece el crecimiento ordenado de la red cristalina. En contraste, el método resistivo genera picos ligeramente más anchos y con menor intensidad, reflejando cristalitas más pequeñas, mayor microdeformación y un desarrollo cristalino menos pronunciado. A pesar de estas diferencias, en ambas técnicas no se observan desplazamientos apreciables en la posición de los picos, lo cual demuestra que la estructura cristalina permanece inalterada y que las condiciones térmicas afectan principalmente la calidad cristalina y no la fase formada. En conjunto, la comparación evidencia que la inducción produce un ZnO más cristalino y con menor densidad de defectos, mientras que la síntesis resistiva conduce a un material igualmente puro, pero con un ordenamiento estructural ligeramente inferior.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten concluir que la cámara de reacción por inducción electromagnética presenta un comportamiento térmico estable, reproducible y dependiente de la posición, con una zona central que ofrece las mejores condiciones para tratamientos térmicos de precisión en materiales semiconductores. La operación sin aire mejora la eficiencia térmica al minimizar las pérdidas por convección, alcanzando temperaturas más altas en menor tiempo, mientras que el uso de aire permite caracterizar el efecto de atmósferas oxidantes y su impacto en la dinámica térmica.

La caracterización detallada de las siete posiciones demuestra que el sistema puede modelarse térmicamente como un proceso de primer orden, con tiempos característicos claros y diferencias de desempeño entre zonas centrales y periféricas. Esto sienta las bases para futuros trabajos de automatización de control térmico, integración de atmósferas reactivas específicas (oxígeno, argón, helio) y aplicación en procesos avanzados de oxidación, dopado y recocido de materiales semiconductores, alineándose con estándares de laboratorios especializados en tratamientos de alta temperatura

En la síntesis de la obtención del oxido metálico semiconductor ZnO, los resultados cuantitativos muestran que ambas técnicas producen ZnO con estructura wurtzita pura, pero con diferencias claras en la calidad cristalina. La muestra obtenida por inducción presenta mayor tamaño de cristalita, menor microdeformación y mayor cristalinidad, lo cual coincide con los picos más estrechos e intensos observados en el difractograma. En contraste, el calentamiento resistivo genera cristalitas más pequeñas y un ligero incremento en la distorsión de red. Por lo tanto, aunque ambas rutas son efectivas para formar ZnO, la técnica por inducción ofrece un material estructuralmente más ordenado y con menor densidad de defectos, lo que puede favorecer su desempeño en aplicaciones optoelectrónicas y catalíticas.

REFERENCIAS

Alsimet. (2021). *ALSIMET*. Obtenido de Tratamientos térmicos: el recocido de metal: https://www.alsimet.es/es/noticias/tratamientos-termicos-el-recocido-de-metal#:~:text=Fases%20del%20proceso%20de%20recocido,llegar%20a%20la%20temperatura%20ambiente

H. D., &. R. (2022). Design and numerical study of induction-heating graphitization furnace based on graphene coils. *Applied Sciences*, 14(6), 2528.

Hernández–Rojas, M. E.–A.–P. (2024). A Device with a Controllable Internal Atmosphere, Independent from the Heating Furnace, for Sintering Metal Particles. *Materials Research*, 27.

Indutecsa. (05 de Marzo de 2018). *Industrial Technologies SAS*. Obtenido de Hornos de inducción ¿Cómo funcionan?: https://indutecsa.com/hornos-de-induccion-como-

funcionan/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20un%20Horno%20de,que%20se%20utilice%20el%20horno.

Kanthal. (2024). *KANTHAL*. Obtenido de Los procesos atmosféricos determinan los dispositivos semiconductores de alto rendimiento: https://www.kanthal.com/es-es/industrias/solar-y-semiconductores/semiconductors/atmospheric-processes-high-performance-semiconductor/

Kuranova, N. N. (2022). Influence of heat treatment and deformation on the structure, phase transformation, and mechanical behavior of bulk TiNi-based alloys. *Metals*, 12(12), 2188.

Mendi-Altube, A. V. (2024). Electro-thermal modeling of an induction heating process of 42CrMo4 steel probe. *Journal of Applied Engineering,*.

Mesurex. (2018). *MESUREX*. Obtenido de Cámaras para Alta Temperatura: https://mesurex.com/product-category/productos/camaras-alta-temperatura/

Shen, Y. W. (2025). A Method for Preparing Electrically Conductive SiC Ceramics Through Hot-Press Sintering Followed by Nitrogen Pressure Heat Treatment. *Coatings,*, 15(6), 618.

Shen, Y. W. (2025). Design and numerical study of induction-heating graphitization furnace based on graphene coils. *Applied Sciences* , 14(6), 2528.

Toledano, I. (2024 de Mayo de 2021). *CALENTAMIENTO INDUSTRIAL POR INDUCCIÓN: TODO LO QUE NECESITA SABER*. Obtenido de WATTCO: https://www.wattco.com/es/2024/05/calentamiento-por-induccion-industrial/

Yin, S. X. (2022). Heat Transfer Characteristics of High-Temperature Dusty Flue Gas from Industrial Furnaces in a Granular Bed with Buried Tubes. *Energies* , 13(14), 3589.

Zhao, D. Q. (2019). Measurement Techniques for Thermal Conductivity and Interfacial Thermal Conductance of Bulk and Thin Film Materials. *Materials* .

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Review of Current Trends for Battery Charging Systems

C.J.J. García-Velázquez[*], J. Morales-Morales, A. González-Lorence*, M.A.M. Jiménez-Grajales***, C. Morales Morales*[1]**

*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Querétaro, México.
*[1]Corresponding author: {cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx}
m25590767@sjuanrio.tecnm.mx; armida.gl@sjuanrio.tecnm.mx

**Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Guerrero, México
crearjoss@gmail.com

***Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Querétaro, Querétaro, México
maria.jg@queretaro.tecnm.mx

Abstract: This paper presents a review of battery charging and energy storage systems for electromobility, addressing issues such as precise estimation of operational parameters (SoC, SoH, RUL), efficient thermal control, component degradation, rapid charging methods that do not compromise operational lifespan, and adaptation to variable conditions that affect the performance of these devices. The methodology employed consisted of analyzing scientific literature published between 2021-2025 in specialized databases (Scimago, ScienceDirect, IEEE, Web of Science, MDPI), identifying leading research countries (China, United States, India, South Korea, Germany, Japan) and selecting works based on relevance and common terminology. Batteries currently used in electromobility include compositions with nickel, manganese, cobalt, and aluminum, with emphasis on lithium-ion batteries, excluding supercapacitors and fuel cells. Critical variables of the battery system (SoC, SoH, RUL) and their interrelationships are described, along with the control systems involved in their development (EMS, BMS, BTMS), and the importance of using data in modeling to create power and energy supply profiles tailored to specific requirements. Current trends include the development of methods to create accurate SoC, SoH, and RUL profiles, rapid charging and discharging techniques without affecting operational life, thermal degradation management, and computational models that process system information at higher speeds. In conclusion, research trends are identified as being focused on creating advanced control systems through deep learning, artificial intelligence, artificial neural networks (ANN), adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS), and others.

Keywords: batteries, Li-ion, machine learning, EMS, BMS.

1. INTRODUCCIÓN

Las baterías recargables como fuentes de energía eléctrica tienen su origen en la mejora del modelo de Alessandro Volta, creándose un modelo recargable a partir de plomo y ácido. En su momento el tener esta característica las convirtió en un dispositivo mucho más atractivo que su predecesora. A partir de entonces comenzó una lenta pero tenaz carrera por desarrollar baterías con mayor capacidad de almacenamiento de carga y mayor durabilidad. Las baterías recargables como fuente de alimentación para artículos desde electrónica, telecomunicaciones y medicina, hasta tomar relevancia en el campo de la movilidad mediante vehículos eléctricos es ya una gran tendencia en el mundo que, con el pasar de los años, muestra un crecimiento con proyección exponencial según estudios realizados hasta 2023 (Lipu et al., 2022; Ranjith Kumar et al., 2023). Basándonos en estas proyecciones, podemos corroborar que la cantidad de estudios asociados a baterías recargables de litio, celdas de combustible (hidrógeno) y vehículos híbridos es considerablemente amplia, pudiendo ser visualizadas de primera mano, en el creciente parque vehicular que circula por las calles principalmente de Asia y Europa. Cada vez con mayor frecuencia pueden encontrarse estaciones de carga para estos vehículos y la cantidad de dispositivos electrónicos que surgen y son vendidos año con año. Países como China, Corea del Sur, Estados Unidos y Alemania llevan a cabo investigaciones sobre unidades de almacenamiento de energía de litio, sodio y celdas de combustible principalmente, en la figura 1 se pueden apreciar estos datos. En la actualidad las líneas de investigación están concentradas sobre el campo de baterías de iones de litio debido a su capacidad de operar en conjunto con una cantidad importante de elementos y minerales. Sus principales características son la retención de carga eléctrica, la cantidad de ciclos de carga que son capaces de soportar y su alta capacidad térmica, las cuales, las hacen protagonistas en la mayoría de las literaturas de la actualidad.

2. METODOLOGÍA

En este documento se hizo revisión de la literatura disponible de forma concisa respecto al panorama actual de las baterías en el mercado y las baterías en desarrollo. Las principales fuentes consultadas provienen de portales de repositorios científicos como Scimago Journal and Country Rank en temas

de ingeniería de energía y tecnología de potencia hasta el año 2024.

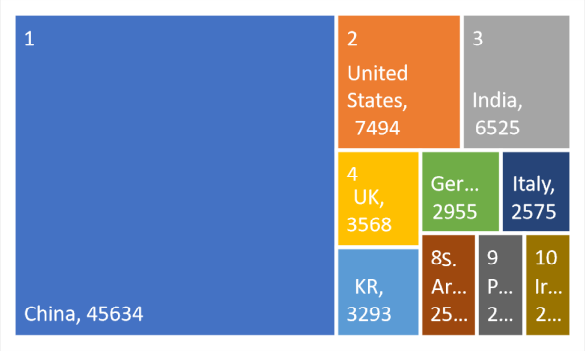


Figura 1. Principales países que realizan investigación en baterías, (Scimago 2024).

Figura 2. Países líderes en investigaciones en energía, (Scimago, 2024).

Los criterios considerados para manejar la información disponible fueron los siguientes:

1. Revisión de información en las bases de datos de Scimago, ScienseDirect, IEEE, Web of Science, MDPI.
2. Selección de trabajos enfocados en la revisión de datos afines y nutridos referentes a las baterías recargables para vehículos eléctricos.
3. Identificación de palabras clave, clasificación de la información por parte de los autores, técnicas de control empleadas y/o mencionadas en sus investigaciones.
4. Agrupar los datos para visualizar las tendencias en este campo de investigación.
5. Presentar resultados y conclusiones.

En la revisión de la literatura disponible y en los criterios de selección de publicaciones entre 2021-2025 respecto al tema de las baterías, se creó un contexto general sobre las baterías desde su clasificación actual, iniciando por su composición, pasando posteriormente a explicar sobre los principales conceptos en el campo de baterías recargables, los métodos de carga y descarga, las tecnologías involucradas en un sistema de carga de baterías, los desafíos que son abordados por investigaciones recientes, las tendencias para futuras investigaciones y finalmente se presentan las conclusiones y comentarios.

En la Figura 3 se muestra el desglose de la información consultada de la revisión de investigaciones sobre baterías y esquemas de carga.

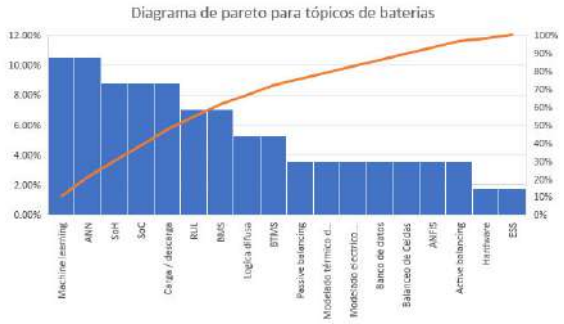


Figura 3. Principales tópicos contenidos en artículos de investigaciones sobre baterías y esquemas de carga.

3. RESULTADOS

China, Estados Unidos, India, Corea del Sur, Alemania, Italia, Japón, Rusia, Canadá, Reino Unido son los principales representantes dentro de temas de ingeniería de energía y tecnología de potencia hasta el año 2024 (Scimago, 2024). La mayoría de autores consultados coinciden en datos puntuales como la historia del campo de las baterías, los materiales de composición de baterías, esquemas de control, variables críticas para su óptimo funcionamiento, y tendencias en líneas de investigación. La carga de baterías es por mucho uno de los temas con más peso en la mayoría las investigaciones consultadas.

3.1. Carga de baterías

Las baterías se pueden clasificar por su composición, capacidad y resistencia al esfuerzo térmico. Por composición hay 5 categorías principales: plomo-ácido, niqueladas, iones de litio, celdas de combustible y tecnología de sodio (Lipu et al., 2022), como se muestra en la figura 4.

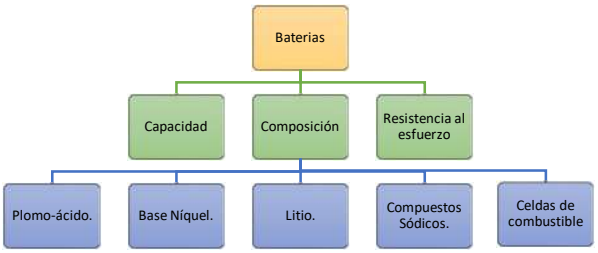


Figura 4. Diagrama de clasificación de baterías basado en su composición.

En un apartado especial se encuentran los super capacitores, sin embargo, son elementos que por sí solos aún no representan una fuente de alimentación y almacenamiento de energía eléctrica de alto rendimiento, siendo incapaz de suministrar la energía necesaria para un vehículo eléctrico y/o equipos que requieran de un funcionamiento prolongado. El grupo de baterías más relevante en la actualidad es la familia de baterías de iones de litio.

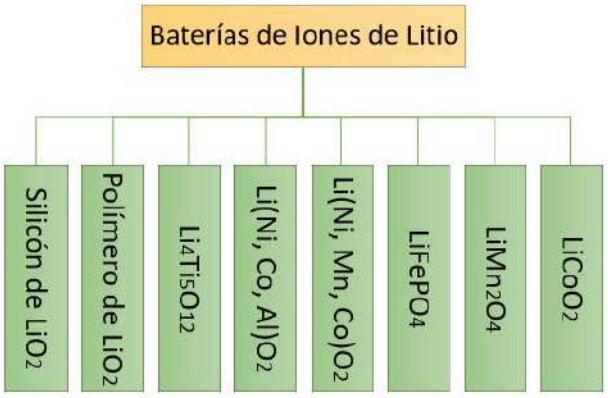


Figura 5. Clasificación de la familia del Litio (trabaja en conjunto con el titanio, níquel, cobalto, aluminio, manganeso, hierro y fosforo).

Este grupo está compuesto por baterías de litio que trabajan en conjunto con elementos como el cobalto, manganeso, fosforo, hierro, níquel, aluminio, titanio, polímeros y silicones (Lipu et al., 2022; Ranjith Kumar et al., 2023). La familia del litio es la que presenta una mayor cantidad de combinaciones de elementos que pueden conformar una batería. Las investigaciones sobre baterías de litio se centran en mejorar sus propiedades de retención de carga, cantidad de ciclos de carga y descarga, resistencia al estrés térmico y vida útil (Lipu *et al.*, 2022; Ranjith Kumar *et al.*, 2023; Krishna *et al.*, 2024; Sultan *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2025). Sin embargo, el litio es un elemento que no es tan abundante como el níquel, aluminio o hierro (C. Reichl and M. Schatz, 2024), por lo que los esfuerzos actuales están centrados en perfeccionar baterías de iones de litio capaces de aprovechar al máximo las capacidades de este elemento. Los sistemas de carga de baterías buscan funcionar de la manera más óptima y eficiente posible para prolongar la vida útil de los dispositivos de almacenamiento tanto como sea posible. La duración actual de una batería de litio está tazada en un promedio de 15 años para dispositivos nuevos y 10 años para baterías reacondicionadas (Zhou et al., 2024).

3.2. Sistemas de carga de baterías.

Los sistemas de carga de baterías se encargan de energizar los dispositivos de almacenamiento de energía, esto lo logran mediante sistemas de monitoreo y control que están en constante comunicación para ajustar la cantidad de energía que será dispuesta para una celda de batería, una batería o conjunto de baterías según sea requerido. Las baterías presentan 3 conjuntos de cualidades que trabajan de manera simultánea: el conjunto electroquímico, conjunto térmico y el conjunto de envejecimiento (Lipu *et al.*, 2022; Ranjith Kumar *et al.*, 2023). Cada una de estas cualidades representa características y problemáticas diferentes entre sí pero que están entre lazadas debido a la naturaleza del proceso de carga y descarga de las baterías, la cantidad de ciclos de carga/descarga y envejecimiento de los componentes (Sordi et al., 2025). En la figura 4 se presenta un diagrama que muestra de manera simplificada el funcionamiento de un sistema de carga de baterías. El sistema de carga de baterías es comúnmente llamado dentro de la literatura como EMS (Energy Management System), el cual es el encargado de optimizar el aporte de energía al sistema de almacenamiento de energía (ESS), según sea la demanda, al mismo tiempo que gestiona la recarga de las unidades de almacenamiento de energía (celdas, baterías o conjuntos de baterías) para garantizar su eficiencia, correcto funcionamiento y el suministro de energía al sistema eléctrico. El EMS toma decisiones mediante la información que recibe de los sistemas secundarios de las unidades de almacenamiento y consumo de energía. El BMS (Battery Management System) es el sistema principal de monitoreo y control dedicado a la batería, además de comunicarse con otros subsistemas como el PMS (Power Management System), (Rahman *et al.*, 2023) y BTMS (Battery Thermal Management System) (Gómez Díaz *et al.*, 2025), y con el sistemas maestros EMS (Energy Management System), (Lipu et al., 2022; Ranjith Kumar et al., 2023; Dini, Saponara and Chakraborty, 2025). En la figura 6 se muestra de manera general una inter conexión del ESS a las redes de alimentación. Esto representa el funcionamiento de un cargador bidireccional. Los cargadores bidireccionales tienen la capacidad suministrar carga en ambas direcciones, de la red a la bateria y viceversa. En este tipo de arquitectura de carga y descarga es importante cuidar la rapidez con la que ocurre el suministro. Las cargas y descargas pronunciadas acortan la vida útil restante de la bateria y la someten a mayor estrés térmico (Gómez Díaz *et al.*, 2025).

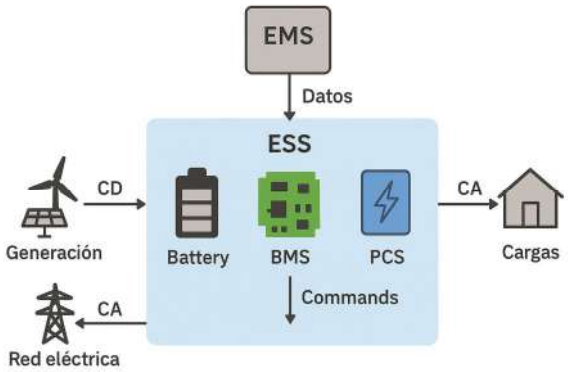


Figura 6. Sistema de Almacenamiento de energía (Energy Storage System, ESS) contiene al Sistema de gestión de batería (Battery Management System, BMS) y al Sistema de control de energía (Power Control System, PCS), administrado por el Sistema de gestión de energía (Energy Management System, EMS).

3.2.1. Sistema de administración de energía (EMS).

Este sistema es el núcleo de control de la batería. Es el encargado de controlar la cantidad de carga eléctrica destinada a cada celda, batería o conjunto de baterías conectadas al sistema eléctrico de una unidad o una red de alimentación. El EMS recibe la información de entrada a través del BMS y todos los elementos activos (fuentes de alimentación) y pasivos (cargas como motores, dispositivos electrónicos, luminarias, etc., conectadas al sistema eléctrico).

3.2.2. Sistema de manejo/administración de baterias (BMS).

Este sistema es el encargado de parametrizar todas las características del funcionamiento de las baterías, celdas de baterías o conjuntos de celdas y baterías. En una batería los elementos que deben ser monitoreados son: el estado de carga (SoC), estado de salud (SoH), vida útil restante (RUL), estado de la energía (SoE), administración de la temperatura (BTMS), diagnóstico de fallas (FD) y adquisición y almacenamiento de datos (Lipu et al., 2022; Sarin and Mani, 2022; Ranjith Kumar et al., 2023). Dentro del diseño del BMS se contemplan 3 modelos para agrupar su funcionalidad y relevancia en una batería: 1) Modelo Electroquímico, 2) Modelo Térmico y 3) Modelo de envejecimiento (Lipu et al., 2022; Ranjith Kumar et al., 2023).

El modelo electroquímico está diseñado para censar constantemente el nivel de carga de la batería. Este proceso es una estimación debido a que cada batería a pesar de estar construida por compuesto químicos conocidos y estudiados a profundidad, estos tienen variaciones en su desempeño que están en constante cambio debido a múltiples factores como la temperatura ambiente, la temperatura del vehículo, los hábitos de conducción del usuario, las fuentes de alimentación, las perturbaciones en la red eléctrica, la fecha de manufactura de la batería, el tiempo que estuvo almacenada, la velocidad con que es cargada y la velocidad con la que debe entregar esa carga al sistema que alimentación (Lipu et al., 2022). Este conjunto de variables son medidas a través de diversos métodos con el fin de obtener el parámetro más elemental de una batería, el SoC, que cual indica cuanta energía esta almacenada en la batería de acuerdo a su capacidad actual, este parámetro es presentado como un porcentaje y es el indicador más sencillo para un sistema de baterías. El estado de potencia (SoP) indica la potencia instantánea que la batería puede suministrar en un momento dado en relación con su capacidad máxima, es presentada en watts/hora. Finalmente, el estado de energía (SoE) es un indicador muy parecido al SoC, siendo diferente al proporcionar información de la energía restante, a modo de ejemplo, una batería que originalmente entregaba 10 A, en un momento puntual solo podra entregar 7 A, siendo los 7 A su estado de energía (Lipu et al., 2022; Ranjith Kumar et al., 2023).

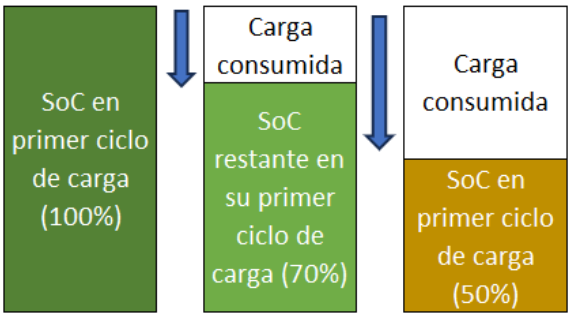


Figura 7. Representación del estado de carga en su primer ciclo de carga y descarga.

La figura 7 ilustra el SoC de la batería en su etapa inicial, con pocos ciclos de carga, en esta etapa inicial la batería puede contener el máximo nivel de carga eléctrica de toda su vida útil. Al ejecutar un número de cargas y descargas N el SoC se acorta, en este punto de su vida útil el máximo nivel de carga que puede retener se reduce en comparación con su estado original. En la figura 8 se adapta la representación del estado de carga con N cantidad de ciclos de carga y descarga.

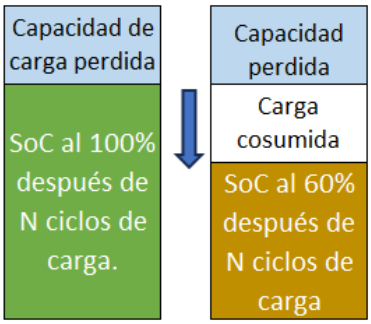


Figura 8. Estado de carga después de N ciclos de carga. El estado de carga máxima se acorta con cada ciclo de carga.

El estado de carga (SoC), se entiende como la carga contenida en la batería respecto a su capacidad actual, puede ir del 100% al 0% de su capacidad máxima actual.

En el modelo térmico se considera el estado de salud de la batería (SoH), determinado por el constante cálculo del SoC. El SoH indica que porcentaje de la batería aún es utilizable respecto al estado inicial. Este parámetro es vigilado dentro de este modelo, considerando los ciclos de carga y descarga que generan reacciones exotérmicas dentro de las celdas de las baterías, estas reacciones producen cristalización y reducción de los componentes originales provocando cada vez menos activos iónicos para conducir la carga eléctrica, se genera más estrés sobre los materiales, provocando más emisión de calor, elevando el proceso de degradación de la batería y su respectivo fin de vida útil. Los hábitos de uso sobre la batería más críticos para este modelo son los daños sobre la estructura que puede provocar generación de gases explosivos y las sobrecargas y descargas profundas, estas generan mayor estrés térmico, que acorta la RUL de la batería. (Lipu et al., 2022; Ranjith Kumar et al., 2023; Gómez Díaz et al., 2025). Ejemplo ilustrativo en la figura 9.

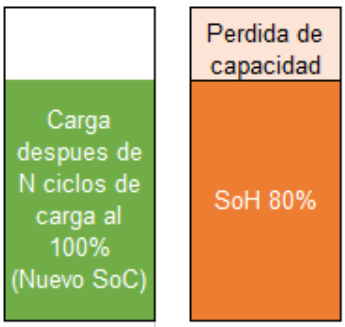
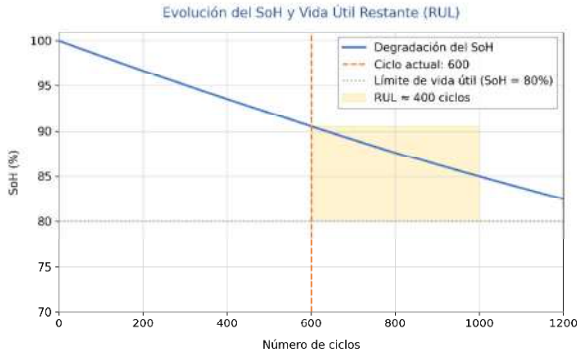


Figura 9. SoC vs SoH. Ambos estados se reajustan durante la carga y descarga de una batería, SoC muestra la carga contenida en la batería en base a la carga máxima actual, el SoH muestra la carga

que puede contener la batería en su estado actual respecto a su estado máximo original.

El modelo de envejecimiento busca la estimación de la vida útil restante de la batería (RUL). Esta se obtiene al contabilizar la cantidad de ciclos de carga y descarga que puede soportar la batería antes de llegar a la condición de fallo menos los ciclos de carga y descarga ejecutados (Lipu et al., 2022; Ranjith Kumar et al., 2023; Sultan et al., 2025). Ejemplo ilustrativo en la figura 10.



La figura 10 muestra la recta con pendiente negativa característica de una batería al analizar la relación de ciclos de carga y descarga respecto a el SoH. La pendiente negativa representa la degradación progresiva que ocurre en el SoH de las baterías con cada ciclo de carga, la estimación de la gráfica está hecha a partir de los 600 ciclos, el límite de vida útil en este ejemplo está marcado al 80%, a partir de este punto la batería pierde capacidad de retención de carga, cuando el SoH está entre el 80% y 50% la batería requiere mantenimiento como reparaciones o sustitución de componentes en caso de ser viable. Por debajo del 50% del SoH la batería está en zona de fallo y debe ser remplazada.

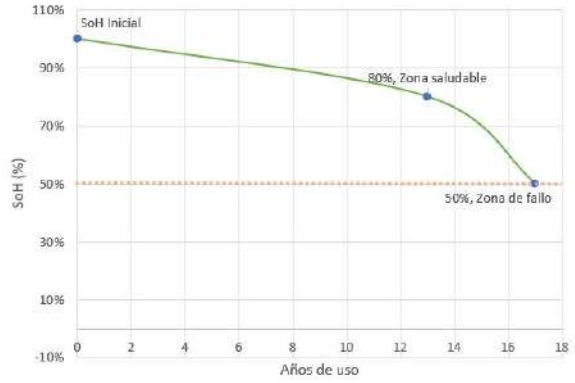


Figura 11. Representación del cambio en la degradación del SoH, adaptación en español de la gráfica mostrada en (Sultan *et al.*, 2025).

La figura 11 muestra las zonas de operación de una batería recargable en función de su SoH, a medida que va disminuyendo su SoH, la batería se aproxima a su zona de falla. La zona de falla representa el momento de cambiar la bateria para evitar problemas graves como el riesgo por daño térmico.

3.2.3. Sistemas de adquisición de datos

Al medir y controlar todas estas variables es necesario utilizar instrumentos adecuados para cada proceso. A nivel eléctrico todo se reduce a medir corriente y voltaje, mientras que a nivel térmico se estarán monitoreando la resistencia eléctrica de las unidades de almacenamiento y la intensidad de corriente mediante un sistema de adquisición de dato adecuado al tipo de señal o fuente que se debe parametrizar. En este sistema se consideran las características de las celdas o baterías (Lipu *et al.*, 2022). Todas las lecturas de señales pasan por un proceso de conversión, donde señales analógicas medidas son convertidas a señales digitales mediante un ADC, esto con la finalidad de poder ser procesadas de manera automatizada por procesos computarizados (Lipu et al., 2022; Ranjith Kumar et al., 2023). Actualmente hay tarjetas comerciales con los elementos necesarios para hacer esta adquisición y conversión de datos. Ejemplo ilustrativo en la figura 12.

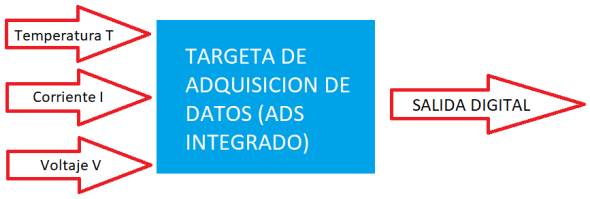


Figura 12. Proceso de adquisición de datos, pasando de conversión A/D a un sistema de adquisición de datos.

3.2.4. Esquemas de control más comunes utilizados en un BMS

Dentro de la ingeniería clásica, las técnicas de control más utilizadas por décadas fueron las enfocadas en lazo cerrado, los modelos PD, PI y PID son los más conocidos dentro de la teoría clásica de control. Con la expansión de la computación durante los primeros años del siglo XXI, empezaron a tomar relevancia otros métodos de control basados en paradigmas más elaborados, pero a su vez más sencillos de manejar bajo ciertas características en comparación de la teoría clásica de control. El esquema más simple implementado en los sistemas de control de baterías es el ON/OFF (Zainurin, Anas and Singh, 2021). Este esquema es el más sencillo de implementar. Un relevador que se activa una vez que la carga de la batería ha llegado a su límite inferior, permite el flujo de energía hacia la batería, al llegar al límite superior de control este se desactiva manteniendo a la batería en un nivel óptimo de carga. Los niveles de carga recomendada en baterías se muestran en la figura 13.

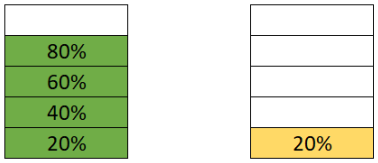


Figura 13. Nivel de carga y descarga de una batería.

Este esquema necesita recalibrarse constantemente para poder garantizar un funcionamiento correcto de la batería, lo cual representa un problema porque depende de un control manual periódico. Al introducir un sistema de control por lógica difusa, el sistema adquiere más rangos de carga y descarga a los que llamaremos modos de carga al colocarlos en la cantidad de condiciones que el programa calcule. Esto puede parecer práctico y sencillo a primera instancia, pero se queda corto al recordar que las condiciones de operación de una batería no son estáticas, estas van cambiando de acuerdo al nivel de uso, temperatura de operación, tiempo entre cargas y descargas, potencia entregada, energía almacenada, etc. A raíz de este panorama, aparecen estudios que presentan propuestas más robustas para mejorar el sistema de control de carga de baterías, estos añaden técnicas más elaboradas como las redes neuronales artificiales (ANN), (Komaragiri, 2024); mientras otras proponen modelos que combinen más de un esquema de control para ir mejorando la optimización de monitorización de las variables de la batería como (Suhail et al., 2021), machine learning (ML) y deep learning, empleando modelos como el bosque aleatorio, (Komaragiri, 2024; Renold and Kathayat, 2024). Las características generales de cada uno están descritas en el diagrama de Ichikawa de la figura 14.

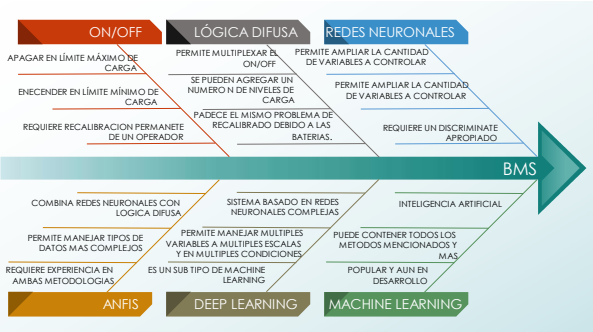


Figura 14. Diagrama de Ichikawa que simplifica los modelos de control empleados en investigación de baterías.

Control ON/OFF

El sistema clásico de carga encendido/apagado (ON/OFF en inglés) es sencillo de implementar, requiere relevadores que se activen y desactiven en los niveles de carga calibrados desde diseño. Su aplicación se basa en conocimientos técnicos de electricidad y electrónica. El principal desafío de este método de control es su rigidez. Las baterías son elementos con características cambiantes lo que puede provocar su fallo anticipado por intervalos más cortos de activación y desactivación debido a la pérdida de capacidad de retención de carga de la batería. Otro problema a considerar es que por cada tipo de magnitud a controlar se requiere al menos un par de relevadores (Zainurin, Anas and Singh, 2021).

Control por lógica difusa

El control de baterías mediante lógica difusa es fácil de implementar en condiciones controladas, siendo más flexible por tratarse de un método basado en software, se colocan niveles de carga deseados para la activación y desactivación de las fuentes de alimentación, se consideran tantos niveles de referencia como sean necesarios y pueden modificarse más fácilmente que el hardware. Sin embargo, presenta un par de inconvenientes: 1) el problema de las condiciones cambiantes de las baterías a lo largo del tiempo persiste y se mantiene la necesidad de un constante ajuste de las reglas de control dentro del esquema de lógica difusa y 2) se requiere un bloque de control mediante lógica difusa por cada tipo de señal a controlar y dentro del campo de baterias actualmente se han probado trazas de lógica difusa que incluyen análisis jerárquico, Mandani, Sugeno y PID híbrido (Zainurin, Anas and Singh, 2021).

Control por redes neuronales

Las redes neuronales artificiales (ANN), concurrentes (CNN), recurrentes (RNN), permiten múltiples entradas. En estas técnicas de control se puede recibir las 3 señales a controlar de manera simultánea. Las redes neuronales pueden tener múltiples capas ocultas lo que permite hacer un control a la medida de las baterías. El principal inconveniente de este método es que requiere un periodo de entrenamiento que entre más capas contenga la red más extensa será. Otro de los puntos a considerar es la función discriminante o sigmoide a emplear, esta debe ser capaz de clasificar la información recibida de las múltiples señales recolectas desde las baterías (Komaragiri, 2024).

Tabla 1. Comparación entre modelos de control en baterías.

Método de control	Tipo / clases	Diseño	Complejidad	Aplicación en baterías
On/Off	Hardware / software	Rigido	Baja	Limitado a la activación de componentes.
Lógica Difusa	Mamdani, Sugeno, PID Hibrido, jerarquica.	Flexible	Baja	Empleada en la caracterización del SoC, SoH y RUL por separado.
Redes neuronales	ANN, CNN, RNN	Flexible	Media	Empleada en la caracterización del SoC, SoH y RUL en conjunto.
ANFIS	Logica difusa + redes neuronales	Flexible	Media-Alta	Empleada en la caracterización del SoC, SoH y RUL en conjunto.
Deep Learning	CNN-LSTM, Autoencoders, DBN	Flexible	Alta	Empleada en la caracterización del SoC, SoH y RUL, control del EMS
Machine Learning	Bosque aleatorio	Flexible	Alta	Empleada en la caracterización del SoC, SoH y RUL, control del EMS

En la tabla 1, se puede apreciar elementos simples-característicos de los enfoques de control aplicables a baterías.

Control por redes de inferencia difusa ANFIS

Los sistemas de inferencia difusa basados en redes adaptativas (ANFIS) son una evolución conjunta de las redes neuronales profundas y los sistemas de lógica difusa. La principal diferencia entre una red neuronal y una ANFIS es que las redes neuronales clasifican la información después del filtrado en 0

y 1, mientras que los valores que clasifica el ANFIS son difusos, tomando valores intermedios (Rahman *et al.*, 2023).

Control por redes neuronales profundas.
Las redes neuronales profundas son una variante del método por redes neuronales artificiales, están diseñadas para retroalimentarse del error y hacer predicciones futuras más acertadas. En baterias se han utilizado redes profundas CNN-LSTM para extraer características locales de una señal y entender su evolución a través del tiempo, autoenconders profundos que son redes profundas no supervisadas que aprenden representaciones comprimidas de los datos y redes DBN que se entrenan capa por capa para después realizar una discriminación global de la informacion. Las redes neuronales profundas pueden trabajar con un número mayor variables en comparación con los métodos anteriores. Las desventajas de este método es su costo en recursos computacionales, la dificultad de conocer las salidas obtenidas al no ser respuestas lineales y ser métodos que requieren un alto nivel de habilidades de programación y abstracción de modelos matemáticos complejos hacia el diseño de software.

Control por Inteligencia Artificial
El aprendizaje máquina (Machine Learning) es un modelo que emplea la inteligencia artificial para retroalimentarse del error a la par que puede ejecutar una o múltiples acciones determinadas (Komaragiri, 2024; Renold and Kathayat, 2024; Sultan *et al.*, 2025). El ML es utilizado como método de control de baterías por su capacidad de procesamiento de datos, su aprendizaje autónomo y que ofrece la posibilidad de combinar todas las opciones anteriores. El método recurrente dentro del control de baterias es el bosque aleatorio (random forest) debido a su capacidad de identificar patrones complejos mostrando resultados precisos y estables. (Sultan *et al.*, 2025).

4. CONCLUSIONES

En la revisión de los sistemas de carga y gestión de baterías de iones de litio en electromovilidad, se identifica la evolución desde métodos de control clásicos (ON/OFF, lógica difusa) hacia nuevas tendencias basados en inteligencia artificial (ANN, ANFIS, machine learning) para la gestión de parámetros críticos como SoC, SoH y RUL. La complejidad actual radica en trabajar con bancos de datos variados provenientes de entornos de uso cotidiano, condiciones extremas, consumo constante, cargas y descargas máximas permitidas, y condiciones límite de falla, lo cual representa tanto un desafío como una oportunidad para desarrollar modelos más robustos. Es importante reconocer las limitaciones inherentes: la rápida evolución del campo implica que nuevas técnicas emergen constantemente, la mayoría de estudios se centran en condiciones controladas de laboratorio que no reflejan completamente la variabilidad de aplicaciones reales, y existe dificultad para comparar directamente diferentes técnicas debido a variaciones en plataformas de prueba y métricas reportadas. Los hallazgos coinciden con la tendencia identificada por la mayoría de autores: combinar técnicas de control y análisis de datos para encontrar modelos eficientes que permitan prolongar la vida útil, perfeccionar el balanceo de baterías y obtener estimaciones precisas de valores clave. En trabajos futuros se recomienda desarrollar algoritmos de machine learning operables en tiempo real con recursos limitados, crear bases de datos estandarizadas, investigar métodos de carga ultra-rápida minimizando estrés térmico, e integrar sistemas BMS con infraestructuras de carga inteligente.
La complejidad del tema radica principalmente en ¿cuál de todos los métodos estudiados y en curso será el más eficiente? En revisiones de expertos como Kumar y Lipu se exhorta a combinar métodos para obtener procesos más eficientes y prolongar la vida útil de las baterías, con lo que es fácil intuir que cada nueva permutación creara una nueva línea de investigación y a su vez aportando nuevas disyuntivas sobre cual decisión tomar a la hora de cargar una bateria. Es necesaria más investigación sobre pruebas de simulación para acelerar el proceso de descarte o aporte sobre los conocimientos ya existentes y asi poder cerrar la brecha que mantiene viva la discusión sobre la eficiencia de la carga de baterias.C. Reichl and M. Schatz (2024) *World Mining Data 2024*.

Gómez Díaz, K.Y. *et al.* (2025) “Thermal Management Systems for Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles: A Review,” *World Electric Vehicle Journal*, 16(7), pp. 1–22. Available at: https://doi.org/10.3390/wevj16070346.
Komaragiri, V.B. (2024) “Data-Driven Approaches to Battery Health Monitoring in Electric Vehicles Using Machine Learning,” *International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM)*, 12(01), pp. 1018–1037. Available at: https://doi.org/10.18535/ijsrm/v12i01.ec04.
Krishna, G. *et al.* (2024) “Advanced battery management system enhancement using IoT and ML for predicting remaining useful life in Li-ion batteries,” *Scientific Reports*, 14(1). Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-024-80719-1.
Lipu, M.S.H. *et al.* (2022) “Battery Management, Key Technologies, Methods, Issues, and Future Trends of Electric Vehicles: A Pathway toward Achieving Sustainable Development Goals,” *Batteries*. MDPI. Available at: https://doi.org/10.3390/batteries8090119.
Rahman, A. *et al.* (2023) “Solar Energy Dependent Supercapacitor System with ANFIS Controller for Auxiliary Load of Electric Vehicles,” *Energies*, 16(6). Available at: https://doi.org/10.3390/en16062690.
Ranjith Kumar, R. *et al.* (2023) “Advances in Batteries, Battery Modeling, Battery Management System, Battery Thermal Management, SOC, SOH, and Charge/Discharge Characteristics in EV Applications,” *IEEE Access*, 11(October), pp. 105761–105809. Available at: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3318121.
Renold, A.P. and Kathayat, N.S. (2024) “Comprehensive Review of Machine Learning, Deep Learning, and Digital Twin Data-Driven Approaches in Battery Health Prediction of Electric Vehicles,” *IEEE Access*, 12(March), pp. 43984–43999. Available at: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3380452.
Sultan, Y.A. *et al.* (2025) “Enhancing electric vehicle battery lifespan: integrating active balancing and machine learning for precise RUL estimation,” *Scientific Reports*, 15(1), pp. 1–18. Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-024-82778-w.
Zainurin, N.A., Anas, S.A.B. and Singh, R.S.S. (2021) “A

Review of Battery Charging - Discharging Management Controller: A Proposed Conceptual Battery Storage Charging – Discharging Centralized Controller," *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 11(4), pp. 7515–7521. Available at: https://doi.org/10.48084/etasr.4217.
Zhang, Z. *et al.* (2025) "A Hybrid RUL Prediction Framework for Lithium-Ion Batteries Based on EEMD and KAN-LSTM," pp. 1–17.

5. REFERENCIAS

Dini, P., Saponara, S. and Chakraborty, S. (2025) "System-Level Compact Review of On-Board Charging Technologies for Electrified Vehicles: Architectures, Components, and Industrial Trends," pp. 1-46

C. Reichl and M. Schatz (2024) *World Mining Data 2024*.

Gómez Díaz, K.Y. et al. (2025) "Thermal Management Systems for Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles: A Review," World Electric Vehicle Journal, 16(7), pp. 1-22. Available at: https://doi.org/10.3390/wevj16070346.

Komaragiri, V.B. (2024) "Data-driven Approaches to Battery Health Monitoring in Electric Vehicles Using Machine Learning," International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM), 12(01), pp. 1018-1037. Available at: https://doi.org/10.18535/ijsrm/v12i01.ec04.

Krishna, G. *et al.* (2024) "Advanced Battery Management System Enhancement Using IoT and ML for Predicting Remaining Useful Life in Li-Ion Batteries," *Scientific Reports*, 14(1). Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-024-80719-1

Lipu, M.S.H. *et al* (2022) "Battery Management, Key Technologies, Methods, Issues, and Future Trends of Electric Vehicles: A Pathway Toward Achieving Sustainable Development Goals," Batteries. MDPI. Available at: https://doi.org/10.3390/batteries8090119.

Rahman, A. et al. (2023) "Solar Energy Dependent Supercapacitor System with ANFIS Controller for Auxiliary Load of Electric Vehicles." Energies 16(6). Available at: https://doi.org/10.3390/en16062690.

Ranjith Kumar, R. *et al.* (2023) "Advances in Batteries, Battery Modeling, Battery Management System, Battery Thermal Management, SOC, SOH, and Charge/Discharge Characteristics in EV Applications," IEEE Access, 11(October), pp. 105761-105809. Available at: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3318121.

Ronald A.P. and Kathayat, N.S. (2024) "Comprehensive Review of Machine Learning, Deep Learning, and Digital Twin Data-Driven Approaches in Battery Health Prediction of Electric Vehicles," IEEE Access, 12(March), pp. 43984-43999. Available at: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3380452.

Sarin, C.R. and Mani, G. (2022) "An Intelligent BMS With Probabilistic MO-GSA Based CDMAS Integrating Edge Controller Analytics," IEEE Access, 10, pp. 115802-115814. Available at: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3218683.

Scimago (2024) *SCImago Journal & Country Rank*. Disponible en: https://www.scimagojr.com/ (Accedido: 12 de octubre de 2025).

Sordi, G. *et al.* (2025) "Degradation of Lithium-Ion Batteries Under Automotive-Like Conditions: P2D Model-Based Understanding and Ex-Situ Validation," eTransportation, 24(February). Available at: https://doi.org/10.1016/j.etran.2025.100410.

Suhail, M. *et al*. (2021) "Development of Progressive Fuzzy Logic and ANFIS Control for Energy Management of Plug-In Hybrid Electric Vehicle," IEEE Access, 9, pp. 62219-62231. Available at: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073862.

Sultan, Y.A. *et al.* (2025) "Enhancing Electric Vehicle Battery Lifespan: Integration Active Balancing and Machine Learning for Precise RUL Estimation," Scientific Reports, 15(1). Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-024-82778-w.

Zainurin, N.A., Anas, S.A.B. and Singh, R.S.S. (2021) "A Review of Battery Charging – Discharging Management Controller: A Proposed Conceptual Battery Storage Charging – Discharging Centralized Controller, "Engineering, Technology and Applied Science Research, 11(4), pp. 7515-7521. Available at: https://doi.org/10.48084/etasr.4217.

Zhang, Z. *et al*. (2025) "A Hybrid RUL Prediction Framework for Lithium-Ion Batteries Based on EEMD and KAN-LSTM," pp. 1-17.

https://www.scimagojr.com/countryrank.php?category=2102&area=2100&year=2024

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Self-Sustaining Hybrid Wind-Solar Power System with Lithium-Ion Batteries for Residential Applications.

Rivera Pérez Denys., Gutiérrez González E., Demesa-López F.N., Serrano-Arellano J. *

División de Estudios de Posgrado e Investigación, IT de Pachuca. Tecnológico Nacional de México. Carretera México-Pachuca km. 87.5, Colonia Venta Prieta, Pachuca de Soto, Hgo. C.P. 42080. México.
**Correo electrónico: juan.sa@pachuca.tecnm.mx.*

Abstract: This article describes the design, simulation, and analysis of a hybrid power generation system for households with limited access to the conventional grid. It combines solar and wind energy with lithiumion batteries, aiming to provide a self-sustaining, technically and economically viable solution. The system integrates bifacial monocrystalline photovoltaic panels, vertical-axis Savonius wind turbines, and a hybrid charge controller with an MPPT algorithm. The modeling was carried out in MATLAB Simulink, incorporating real climatic conditions and typical load profiles, considering a maximum daily demand of 4 kWh and one day of energy autonomy. The system was resized for implementation in social housing, optimizing the number of modules without compromising operational stability. The results show that, with an appropriate design, the proposed solution can efficiently meet residential energy demand, reduce reliance on fossil fuels, and promote a sustainable energy model, contributing to improved quality of life in isolated communities.

Keywords: Hybrid generation, Renewable energy, Savonius wind turbine, Photovoltaic panels, Lithiumion batteries.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el impacto ambiental de las fuentes energéticas convencionales ha impulsado el desarrollo de sistemas híbridos solar-eólicos con almacenamiento en baterías, capaces de garantizar suministro continuo y reducir la dependencia de combustibles fósiles (Juárez & Alvarado, 2011; González & Sera, 2002). El uso de baterías de ion-litio y controladores MPPT híbridos mejora la eficiencia, minimiza pérdidas y prolonga la vida útil de los componentes (Stroe et al., 2018). Este trabajo presenta el diseño y simulación de un sistema híbrido para una vivienda en Pachuca de Soto, Hidalgo, con consumo diario de 4 kWh, configurado con panel solar bifacial de 720 W, aerogenerador Savonius de 600 W y banco de baterías de litio, logrando una reducción superior al 70 % en componentes sin comprometer el suministro. Los resultados demuestran su viabilidad técnica y económica, con potencial para su implementación modular en comunidades de bajos ingresos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema híbrido propuesto está diseñado para abastecer una vivienda de interés social con consumo máximo diario de 4 kWh y autonomía mínima de un día. Los componentes fueron seleccionados bajo criterios de sostenibilidad, eficiencia y viabilidad económica.

2.1 Paneles solares

Se utilizaron paneles solares monocristalinos bifaciales de 720 W (hasta 792 W en condiciones óptimas), por su alta eficiencia y captación por ambas caras. El modelo se implementó en MATLAB/Simulink considerando la ecuación del diodo, pérdidas internas, temperatura e irradiancia.

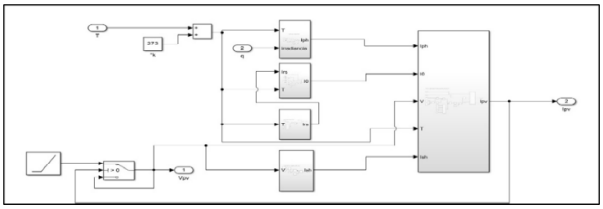


Figura 1. Modelo Simulink del módulo fotovoltaico (subnivel). Fuente: Elaboración propia con base en datos de MATLAB.

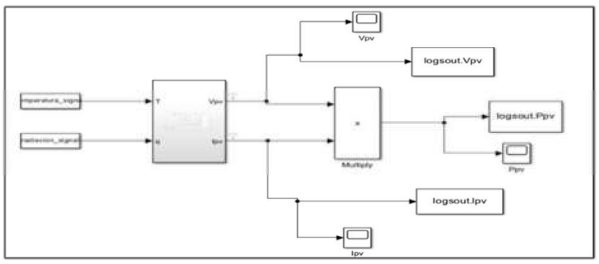


Figura 2. Modelo Simulink del módulo FV Primer nivel. Fuente: Elaboración propia con base en datos de MATLAB.

2.2 Generador eólico Savonius

Se integró un aerogenerador Savonius de eje vertical de 600 W, óptimo para vientos bajos y turbulentos. El modelo incluye el cálculo del coeficiente de potencia (Cp), torque y conversión mecánico-eléctrica hacia un generador DC.

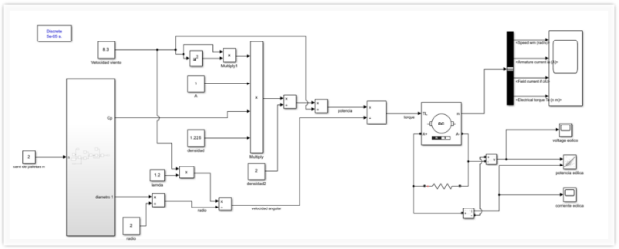


Figura 3. Modelo Simulink del sistema eólico tipo Savonius.Fuente: Elaboración propia con base en datos de MATLAB.

2.3 Banco de baterías

El almacenamiento está compuesto por cuatro baterías de ionlitio (12 V, 100 Ah) en serie, con 4.8 kWh totales. El modelo incluye balance energético, autodescarga y degradación.

2.4 Controlador de carga híbrido e inversor

El controlador MPPT híbrido tipo Perturb and Observe gestiona panel y aerogenerador, acoplado a convertidores boost para estabilizar tensión y a un inversor de onda sinusoidal pura (120/240 V).

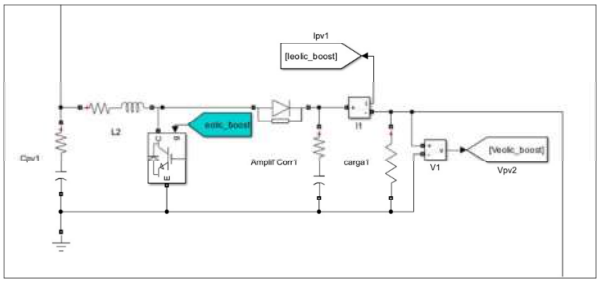


Figura 4. Convertidor boost con control MPPT. Fuente: Elaboración propia con base en datos de MATLAB.

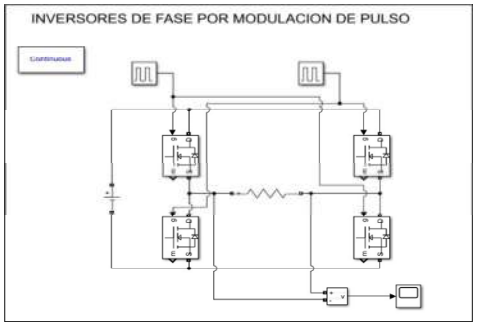


Figura 5. Inversor monofásico PWM. Fuente: Elaboración propia con base en datos de MATLAB.

2.5 Sistema integrado

Todos los componentes se integraron en MATLAB/Simulink con datos climáticos reales de Pachuca de Soto (irradiancia, temperatura, viento). El modelo permite evaluar desempeño anual y confiabilidad del sistema.

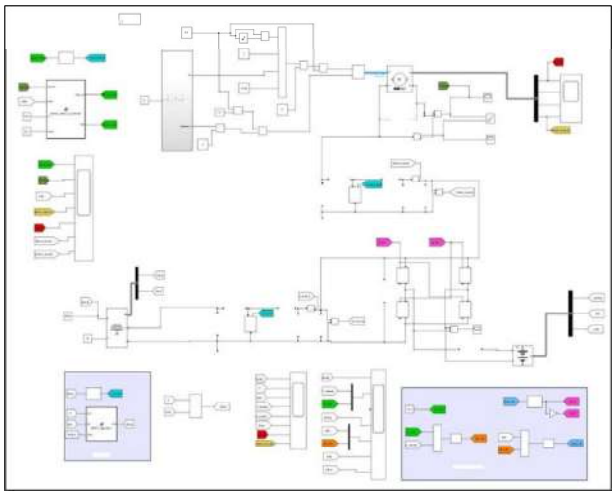


Figura 6. Modelo integrado del sistema híbrido solar-eólico con almacenamiento. Fuente: Elaboración propia con base en datos de
MATLAB.

Ecuación del modelo fotovoltaico

El módulo fotovoltaico se modeló mediante el **circuito equivalente de un diodo**, ampliamente utilizado para representar el comportamiento eléctrico de una celda solar. La corriente en el terminal del módulo (I) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{q\,(V + IR_s)}{nkT}\right)} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

donde:

- I_{ph}: corriente fotogenerada (dependiente de la irradiancia solar)
- I_0: corriente de saturación inversa del diodo
- R_s: resistencia serie
- R_{sh}: resistencia en derivación (shunt)
- q: carga del electrón
- k: constante de Boltzmann
- T: temperatura de la celda (en Kelvin)
- n: factor de idealidad del diodo

Tabla 1: Supuestos de simulación y especificaciones de los componentes.

Parámetro	Valor (utilizado en la simulación)	Nota / Fuente
Perfil de carga simulada (diario)	**4.0 kWh por día**	Consumo utilizado en el caso base.
Demanda del sistema redimensionado	**3.2 kWh por día**	Diseño optimizado (ahorro de energía).
Módulo fotovoltaico	**JA Solar 720 W – 1 unidad**	Potencia tomada de la tabla de costos.
Generador eólico	**Savonius VAWT 500 W – 1 unidad**	Configuración híbrida.
Controlador de carga (MPPT)	**EPEVER / TRIRON 4210N híbrido MPPT**	Controlador utilizado en la instalación.
Algoritmo MPPT	**Perturb & Observe (P&O)**	Implementado en Simulink.
Inversor	**Must Power de onda senoidal pura, 1500 W**	Convierte corriente continua a alterna.
Banco de baterías	**4 × 12 V 100 Ah (≈ 4.8 kWh nominal)**	DOD = 80 %, eficiencia ≈ 90 %.
Autonomía del sistema	**1 día**	Tomado de la tabla del sistema redimensionado.
Datos climáticos	**Irradiancia, temperatura y viento horarios (EPW de Pachuca)**	Datos reales locales.
Eficiencia del inversor	**95 % (asumida)**	Valor típico.
Pérdidas en cableado	**3 % (asumidas)**	Estimación estándar.
Costo total del sistema	**54 000 MXN**	De la Tabla 2 (sistema redimensionado).
Paso de tiempo de simulación	**Cada hora**	Especificar si difiere.

3. RESULTADOS

Las simulaciones desarrolladas en MATLAB Simulink permitieron evaluar el comportamiento eléctrico del sistema híbrido propuesto bajo condiciones climáticas reales, considerando un perfil de carga diario de 4 kWh y una autonomía de 1 día. A continuación, se detallan los principales resultados y su interpretación técnica.

Desempeño del sistema fotovoltaico El modelo de panel bifacial monocristalino de 720 W mostró un rendimiento estable durante las simulaciones. Las curvas I-V y P-V generadas evidencian un punto de máxima potencia (MPP) bien definido, en torno a los 720 W bajo irradiancia de 1000 W/m² y temperatura estándar, con posibilidad de alcanzar hasta 792 W en condiciones óptimas. Las oscilaciones presentes en voltaje y corriente fueron mínimas, validando la efectividad del controlador MPPT implementado.

Comportamiento del subsistema eólico El generador Savonius de eje vertical mostró un arranque progresivo, con la velocidad angular estabilizándose tras los primeros segundos de simulación. La corriente de armadura y el torque eléctrico se mantuvieron constantes, lo que indica que el sistema de control mantuvo la excitación del generador de forma óptima. La simulación reveló que un diseño de 3 álabes helicoidales ofrece el mejor compromiso entre estabilidad de torque y eficiencia aerodinámica.

Interacción con el banco de baterías Durante la carga, el banco de baterías de 4.8 kWh presentó un comportamiento eficiente: el voltaje del banco se mantuvo cercano a 48 V y la corriente de entrada (iB) osciló alrededor de su valor de referencia (iB_ref). Este seguimiento preciso demuestra que la conversión DC-DC regulada por el MPPT está operando correctamente. El estado de carga (SOC) evolucionó de forma ascendente sin caídas abruptas, validando la autonomía energética del sistema bajo el perfil de consumo establecido.

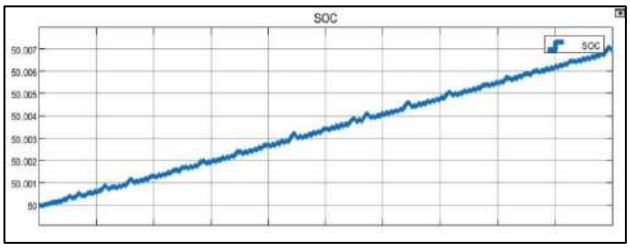


Figura 7: Gráfica de carga del sistema de baterías. Fuente: Elaboración propia con base en datos de MATLAB.

La gráfica de la figura 8 muestra la evolución temporal del estado de carga (SOC, por sus siglas en inglés) del banco de baterías dentro del sistema híbrido de generación renovable. El eje vertical representa el porcentaje de carga de la batería, comenzando cerca del 50% y mostrando un incremento gradual a lo largo del tiempo. Esta tendencia ascendente indica que el sistema está recargando las baterías de manera continua, producto de la energía suministrada por los módulos solares y/o eólicos. La presencia de pequeñas oscilaciones refleja las variaciones dinámicas en la corriente de carga debido a la respuesta del controlador MPPT o a la variabilidad en las fuentes de generación, lo cual es normal en condiciones reales. En conjunto, la gráfica valida el correcto funcionamiento del sistema de almacenamiento energético.

A continuación, se muestran las tablas del costo sistema en un primer prototipo, posteriormente el costo redimensionado. La primera columna representa el componente, la segunda la descripción del modelo o tipo. La tercera la cantidad, la cuarta el costo unitario y la última el costo total. La primera tabla 1 corresponde al diseño original, cuyo presupuesto estimado asciende a aproximadamente $ 257,200 pesos mexicanos, una cifra que lo hace inviable para su implementación en una vivienda convencional. Por tal motivo, se procedió al redimensionamiento del sistema, reduciendo tanto la capacidad de carga como el tiempo de autonomía, que pasó de cinco días a uno.

Tabla 2: Costo del sistema original. Fuente: Elaboración propia con base en datos de Engelecenergy (Engelecenergy, n.d.-b), Trinasolar (Trinasolar, n.d.), Jclsolar (Jclsolar, n.d.), Yaxa (Yaxa Colombia, n.d.), Engelecenergy (Engelecenergy, n.d.-a)

Componente	Modelo/Tipo	Cantidad	Costo unitario (MXN)	Costo total (MXN)
Panel solar monocristalino	JA Solar 720W	4	$5,800	$23,200
Generador eólico Savonius	Vertical, álabes helicoidales, 500W	2	$6,500	$13,000
Controlador de carga híbrido MPPT	EPEVER TRIRON 4210N, solar/eólico	1	$3,500	$3,500
Inversor de onda pura 30 KW	Must Power o similar	1	$28000	$28,000
Baterías de litio 12V 100Ah	U-Power o Genérico con BMS	26	$6,000	$156,000
Estructura y accesorios	Montaje, cableado, protecciones	-	-	$23,000
Mano de obra e instalación	Técnico certificado	-		$10,500
Total estimado del sistema				$257,2000 MXN

En la siguiente tabla se ha redimensionado el sistema y se ha vuelto a calcular el costo de los elementos que integran el sistema.

Tabla 3: Costo del sistema redimensionado. Fuente: Elaboración propia con base en datos de Engelecenergy (Engelecenergy, n.d.-
b), Trinasolar (Trinasolar, n.d.), Jclsolar (Jclsolar, n.d.), Yaxa (Yaxa Colombia, n.d.), Engelecenergy (Engelecenergy, n.d.-a)

Componente	Modelo/Tipo	Cantidad	Costo unitario (MXN)	Costo total (MXN)
Panel solar monocristalino	JA Solar 720W	1	$5,800	$5,800
Generador eólico Savonius	Vertical, álabes helicoidales, 500W	1	$6,500	$6,500
Controlador de carga híbrido MPPT	EPEVER TRIRON 4210N, solar/eólico	1	$3,200	$3,200
Inversor de onda pura 1500W	Must Power o similar	1	$4,500	$4,500
Baterías de litio 12V 100Ah	U-Power o Genérico con BMS	4	$6,000	$24,000
Estructura y accesorios	Montaje, cableado, protecciones	-	-	$3,500
Subtotal sin instalación	-	-	-	$47,500
Mano de obra e instalación	Técnico certificado	-	-	$6,500
Total estimado del sistema	-	-	-	$54,000 MXN

Las Tablas 2 y 3 detallan los principales elementos que integran el sistema. A continuación, en la Tabla 4 presenta la comparación entre ambas versiones del diseño. El rediseño permitió disminuir en más del 70 % la cantidad de componentes sin afectar el desempeño funcional: se redujo de cuatro a un panel solar, de dos a un generador eólico, y de veinticinco a cuatro baterías. Esta configuración optimizada continúa satisfaciendo la demanda diaria de 4 kWh, gracias a una gestión energética eficiente y una adecuada selección de los elementos del sistema (Altmimi et al., 2021).

Tabla 4: Comparativa entre el diseño original y el redimensionado. Fuente: Elaboración propia con base en datos de Engelecenergy (Engelecenergy, n.d.-b), Trinasolar (Trinasolar, n.d.), Jclsolar (Jclsolar, n.d.), Yaxa (Yaxa Colombia, n.d.), Engelecenergy (Engelecenergy, n.d.-a)

Parámetro	Diseño Original	Diseño Redimensionado
Consumo diario	10 kWh/día	3.2 kWh/día
Paneles solares (720 W)	4 unidades	1 unidad
Generadores eólicos (500 W)	2 unidades	1 unidad
Baterías (12 V, 100 Ah)	25 unidades	4 unidades
Autonomía	3 días	1 día
Costo total del sistema	$257,200	$54,000

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en las simulaciones confirman la viabilidad técnica de un sistema híbrido autosustentable de generación eléctrica para entornos residenciales, particularmente en viviendas de interés social. La implementación conjunta de paneles solares monocristalinos bifaciales y generadores eólicos tipo Savonius responde eficientemente a las variaciones climáticas típicas de zonas urbanas semiáridas como Pachuca de Soto, al aprovechar la complementariedad temporal de ambas fuentes: irradiancia diurna y viento vespertino/nocturno. El uso de paneles bifaciales con una potencia nominal de 720 W y generación potencial de hasta 792 W permitió maximizar la captación energética sin requerir grandes superficies de instalación. Este aspecto es especialmente relevante en viviendas con espacio limitado en techos. Por su parte, la geometría helicoidal del rotor Savonius aseguró un arranque a bajas velocidades de viento y una operación estable, condiciones comunes en entornos urbanos. Uno de los aportes significativos del trabajo fue la validación de la estrategia de control basada en MPPT híbrido, la cual permitió extraer de forma continua la máxima potencia disponible de ambas fuentes sin generar oscilaciones perjudiciales para el sistema de almacenamiento. Esto se traduce en una mejora en la vida útil de las baterías de ion-litio, reduciendo los ciclos profundos de descarga. Desde una perspectiva económica, el redimensionamiento del sistema demostró que es posible reducir significativamente el número de componentes (paneles, generadores, baterías) sin comprometer la funcionalidad del sistema. Esta adaptación disminuye el costo de implementación, facilitando su adopción en sectores de bajos recursos. El hecho de lograr una autonomía energética de 1 día con un sistema compacto, económico y eficiente representa una contribución clave hacia la democratización de la energía renovable (Farajyar et al., 2023). Por último, la estrategia de integración de datos reales de irradiancia y viento fortaleció la validez del modelo y permite su extrapolación a otros contextos geográficos con características similares. Este enfoque puede servir como base para políticas de electrificación rural y urbana sustentable, especialmente en países en desarrollo.

El sistema híbrido entrega aproximadamente 4.0 kWh por día, con un costo total estimado de 54 000 MXN, lo que equivale a un costo capital de alrededor de 3.7 MXN/kWh y una autonomía de un día.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió validar técnica y económicamente un sistema híbrido de generación eólico-solar con almacenamiento en baterías de ion-litio, diseñado para cubrir las necesidades energéticas de una vivienda de interés social. El modelo propuesto, desarrollado e implementado en MATLAB Simulink, demostró su capacidad para abastecer una demanda diaria de hasta 4 kWh con una autonomía de 1 día, haciendo uso de condiciones climáticas reales de una zona semiárida. Los resultados de simulación evidenciaron un funcionamiento estable y coordinado entre los paneles solares monocristalinos bifaciales de 720 W (con potencial de hasta 792 W), el generador Savonius de eje vertical, y el banco de baterías de 4.8 kWh. El sistema de control basado en MPPT híbrido optimizó la captación energética de ambas fuentes, mejorando la eficiencia del sistema global y reduciendo la profundidad de descarga del banco de baterías. Una de las contribuciones más relevantes del estudio fue el proceso de redimensionamiento, mediante el cual se redujo la cantidad de paneles, aerogeneradores y baterías, manteniendo los niveles de autonomía y estabilidad. Esto permitió disminuir los costos de implementación sin comprometer el rendimiento, haciendo factible su aplicación en viviendas de bajos recursos. La estructura modular del sistema, junto con el empleo de componentes comerciales y escalables, lo convierte en una alternativa realista para avanzar en la autosuficiencia energética residencial.

6. AGRADECIMIENTOS

A SECIHTI por el apoyo económico para realizar los estudios de posgrado. Al TecNM Campus Pachuca, por la infraestructura.

7. CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés económico, profesional o personal que pudiera haber influido en los resultados o interpretaciones presentados en este artículo.

8. REFERENCIAS

Advanced Hybrid Wind / Solar Charge Controller User Manual. (2024).

Ahmad, R., & Farzaneh, H. (2024). *Techno-economic analysis and dynamic power simulation of a hybrid solar-wind-battery system for power supply in rural areas in Pakistan. Cleaner Energy Systems, 8*, 100127. https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100127

Altmimi, A. I., Alaskari, M., Abdullah, O. I., Alhamadani, A., & Sherza, J. S. (2021). *Design and optimization of vertical axis wind turbines using QBlade. Applied System Innovation, 4*(4), 1–12. https://doi.org/10.3390/asi404007

Caneppele, F. L., & Seraphim, O. J. (2010). *Aplicação da teoria fuzzy no controle de sistemas de geração de energias alternativas. Energia Na Agricultura, 25*(2), 1–10. https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/64

Cantera-Cantera, L. A., & Calvillo-T'ellez, A. (2020). *Photovoltaic solar power for a wastewater electrocoagulation prototype. Journal of Scientific and Technical Applications, 6*(18), 32–36. https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Aplicacion_Cientifica_y_Tecnica/vol6num18/Journal_of_Scientific_and_Technical_Applications_V6_N18_4.pdf

Carlos, J., & Rodríguez, L. (2014). *Diseño y control de convertidores cc/cc aplicados a sistemas híbridos de generación distribuida* [Tesis doctoral, Universidad de Jaén]. *Departamento de Ingeniería Eléctrica.*

Engelec. (2025). *EN-600W-XL Datasheet.* Recuperado de https://www.engelecenergy.com

Engelecenergy. (n.d.-a). *EEWS Series 20KW Wind/Solar Hybrid Controller.* Recuperado el 27 de junio de 2025 de https://www.engelecenergy.com/EEWS-Series-20KW-Wind-solar-Hybrid-Controller-pd40316285.html

Engelecenergy. (n.d.-b). *EN-600W-XL Spiral Blades Vertical Axis Small Wind Turbine Generator (VAWT).* Recuperado el 27 de junio de 2025 de https://www.engelecenergy.com/spiral-blades-vertical-axis-small-wind-turbine-generator-en-600w-xl-vawt.html

Farajyar, S., Ghafoorian, F., Mehrpooya, M., & Asadbeigi, M. (2023). *CFD investigation and optimization on the aerodynamic performance of a Savonius vertical axis wind turbine and its installation in a hybrid power supply system: A case study in Iran. Sustainability (Switzerland), 15*(6). https://doi.org/10.3390/su15065318

Georgious, R. G. Z. (2018). *Una solución híbrida de almacenamiento de energía de forma distribuida aplicado a microgeneración en microrredes eléctricas: Diseño del sistema electrónico de potencia y control* [Tesis de maestría, Universidad de Oviedo]. https://lemur.grupos.uniovi.es

Gómez-Franco, W. R., & Huerta, L. (2007). *Inventan novedoso sistema para producir hielo con energía solar. Boletín UNAM-DGCS, 128.* https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2007/2007_128.html

González, M., & Sera, A. S. (2002). *Aplicaciones de los métodos de optimización en el diseño de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos para instalaciones agropecuarias cubanas. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 11*(2), 43–46. https://doaj.org/article/2aefa9a4843744e7838a6c6d19738fc3

Jclsolar. (n.d.). *Inversor solar híbrido.* Recuperado de https://jclsolar.com/products/8kw-10kw-hybrid-solar-inverter-split-output-120v-240v-off-grid-solar-inverter-with-dual-mppt

Jiménez, S., & Carlos, J. (2018). *Energy and economic optimization of PV hybrid systems to supply buildings HVAC demand: Battery modeling and control strategies. Energy, 205*, 117986. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117986

Juárez, A. S., & Alvarado, I. T. (2011). *Impostergable, aprovechar fuentes de energía alternativas. Revista Energía y Sociedad, 3*(1), 15–20.

Kamal, T., Karabacak, M., Hassan, S. Z., Li, H., Arsalan, A., & Rajkumar, R. (2017). *Integration and control of an off-grid hybrid wind/PV generation system for rural applications. 2017 International Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT),* 1–6. https://doi.org/10.1109/ICIEECT.2017.7916543

Khan, F. A., Pal, N., Saeed, S. H., & Yadav, A. (2022). *Techno-economic and feasibility assessment of standalone solar photovoltaic/wind hybrid energy system for various storage techniques and different rural locations in India. Energy*

Conversion and Management, 270, 116217. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116217

Layyar, S., Saini, T., Verma, A., & Kumar, A. (2018). *Hybrid inverter with wind and solar battery charging. International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR), 0869*(7).

LI-10012C Specification. (2024).

Marinić-Kragić, I., Vučina, D., & Milas, Z. (2019). *Concept of flexible vertical-axis wind turbine with numerical simulation and shape optimization. Energy, 167,* 1220–1232. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.026

Masenge, I., & Mwasilu, F. (2020). *Hybrid solar PV-wind generation system coordination control and optimization of battery energy storage system for rural electrification. 2020 IEEE PES/IAS PowerAfrica Conference,* 1–5. https://doi.org/10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219890

Moreno Cevallos, J. R. (2022). *Uso de la energía eólica en generación eléctrica para una vivienda que requiere 4 kWh/día. Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies, 3*(1), 45–52. https://doi.org/10.51798/sijis.v3i1.293

Stroe, D.-I., Zaharof, A., & Iov, F. (2018). *Power and energy management with battery storage for a hybrid residential PV-wind system – A case study for Denmark. Energy Procedia, 155,* 464–477. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.033

Trina Solar. (n.d.). *Vertex N-NEG21C.20.* Recuperado el 27 de junio de 2025 de https://www.trinasolar.com/en-mea/product/VertexN-NEG21C.20

UNAM, C. M. y G. A. C. (2012, 5 de septiembre). *Primer encuentro nacional de ecotecnias.* https://ecotec.unam.mx/eventos/primer-encuentro-nacional-de-ecotecnias

Vertex N. (2024). *Mono multi solutions (695–720 W) N-type i-TOPCon bifacial dual glass monocrystalline module: Trina Solar's Vertex bifacial dual glass performance warranty. Trina Solar.* https://www.trinasolar.com

Yaxa Colombia. (n.d.). *MPPT wind energy – Controlador de carga híbrida solar.* Recuperado el 27 de junio de 2025 de https://colombia.yaxa.co/products/mppt-wind-energy-controlador-de-carga-hibrida-solar-de-12-v-24-v-48-v-turbina-eolica-ajuste-de-voltaje-automatico

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Study of the Energy Behavior of Social Housing Through the use of Energyplus

Santillan Moreno, L.A.* Aguilar Castro, K.M. ** Medina García, S.* Serrano Arellano, J.*

** División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / IT de Pachuca. Carretera México-Pachuca km. 87.5, Colonia Venta Prieta, Pachuca de Soto, Hgo. C.P. 42080. México. (juan.sa@pachuca.tecnm.mx)*

*** División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DAIA- UJAT), Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km. 1, Cunduacán, Tabasco, C.P. 86690. México*

Abstract: In the present research, a theoretical-analytical study was conducted through a simulation with EnergyPlus of a social housing unit located in Pachuca, Hidalgo. This was aimed at understanding the thermal and energy behavior of the house, since construction requirements must be based on the region where it is built. Otherwise, it can influence additional or excessive electricity consumption due to the use of physical equipment for the thermal functionality of the house. Therefore, to carry out the simulation efficiently, the geographical location, orientation, architectural design considering the number of rooms and their location, as well as the materials used, were taken into account. In this way, by applying the simulation methodology, the thermal zones corresponding to the house and the materials that make up each element of the building envelope were defined. And for obtaining results, some of the following output variables were proposed: heating and cooling energies, temperatures on exterior and interior walls, energy gain, and solar radiation, through which a thermal and energy characterization of the envelope was found, highlighting in our case the values of heating and cooling energy required for each type of room that makes up the house. In correspondence with climate change and aiming to reduce the heating of the house, in our case study we observed that the living-dining room requires 900 W of energy to cool, being the highest value. This allows us to see the comparison between the energies required by each room and, consequently, to be in a position to propose an energy optimization that helps minimize energy consumption and cost.

Keywords: Thermal performance, Thermal comfort, EnergyPlus.

1. INTRODUCCIÓN

Un aspecto que cobra cada vez mayor relevancia en la construcción de viviendas residenciales es el comportamiento energético, considerando el consumo de energía natural y artificial que se requiere para su funcionalidad, así como la ganancia de calor que recibe y la condición de confort que perciben los habitantes de la vivienda durante su estancia en ésta.

El análisis energético de una vivienda se puede realizar para cada uno de los elementos que lo conforman, como son: la envolvente, paredes, techo, fachada, ventanas, etc. Ya que se pueden establecer diferentes condiciones para el aprovechamiento y uso de energía trayendo consigo la optimización energética, algunas investigaciones referentes a la envolvente de la vivienda se han desarrollado con la finalidad de observar el comportamiento bajo condiciones tradicionales o estandarizadas y como se modifica su comportamiento por medio de la adecuación de elementos pasivos y/o estructurales.

Yua et al (2015) llevo a cabo una descripción sobre el consumo de energía por parte de la envolvente de una edificación, considerando características de las paredes exteriores e interiores, ventanas, techos, pisos, etc, de tal manera que se establece que se debe considerar todos los elementos que conforman la envolvente, así como la interacción con el medio ambiente, personas y uso de aparatos eléctricos. Por medio del estudio propuesto se define que una parte primordial son las características de los materiales empleados en la construcción de la vivienda sobre todo la capacidad de transferencia de calor.

Chagolla et al (2016) presenta un estudio sobre la demanda energética, la calidad térmica y la calificación energética de las viviendas en el Estado de Morelos, con la finalidad de proponer alternativas para mejorar las condiciones de confort térmico, contemplando cambios en la envolvente. Para lo cual se realizó una simulación térmica de dos viviendas, una vivienda de dos plantas con 50 m^2 de construcción, y otra de una planta con una construcción de 96 m^2 ambas con una envolvente convencional, además consideró un análisis de las condiciones orográficas, climáticas, y demográficas del Estado de Morelos, proponiendo una división del estado en tres regiones climáticas, se realizaron varias simulaciones con el programa de cómputo TRNSYS® ,variando los parámetros que influyen en el comportamiento térmico de las viviendas como son: orientación, geometría, materiales de

construcción, propiedades ópticas, dispositivo de sombreado, ventanas doble panel, construcciones de una o dos plantas, y se determinó como impactan en la demanda energética, o en las condiciones de confort térmico, respectivamente. Con los resultados obtenidos se planteó una escala de valores para otorgar una calificación a las edificaciones en función de un bajo o alto consumo energético.

Ávila et al (2020) realizó un estudio numérico y experimental sobre el comportamiento energético de un techo tradicional respecto a un techo verde, esto con la finalidad de determinar el comportamiento de la temperatura en las caras interior y exterior, así como en el interior de la habitación (caja de prueba) esto con la finalidad de establecer los beneficios de un techo verde respecto a un techo tradicional de concreto. Ya que llega a determinar mediante un comparativo que si hay reducciones de temperatura tanto en la superficie exterior como interior del techo verde respecto al tradicional hasta de 8°C.

Con esta validación del techo verde procede a realizar un estudio de su comportamiento térmico, ambiental y económico en una edificación propuesta y considerando 8 ciudades de México en donde determina que el beneficio térmico se da en todas las localidades, aunque en algunas en menor cantidad como es el caso de Monterrey donde la reducción es de solo 2.2°C; el beneficio económico no es del todo redituable ya que se requiere de 8.8 y 20 años para recuperar la inversión; sin embargo, en términos reales se determina que los techos verdes son recomendables para climas cálido subhúmedo y cálido muy árido, ya que en estos la reducción de energía para acondicionamiento de aire se reduce hasta en un 45%.

Magdy et al (2023) presenta un estudio sobre el comportamiento de consumo de energía en un edificio educativo (biblioteca) considerando 2 zonas para hacer un contraste de variables que influyen en el consumo de éste. La finalidad es establecer el consumo de energía considerando sistemas de calentamiento, enfriamiento y aire acondicionado (HVAC) así como las cargas de enfriamiento, es por ello que se hace una propuesta de medición de temperaturas con sensores en diversas horas de cada día de la semana, con lo cual se establece los días y horas de mayor consumo de energía, pudiendo establecer así en qué momento y cuánto tiempo deben operar los sistemas de refrigeración y ventilación para poder optimizar el consumo de energía durante la semana, estableciendo los momentos de mayor demanda de energía por condiciones de la temperatura en el edificio, con las mediciones realizadas al contrastar con las simulaciones las variaciones son mínimas mostrando errores de entre el 4.5% y 6% por lo que se consideran válidas.

Qadourah et al (2024) realizó un estudio numérico de un techo verde aplicado en un edificio de tamaño medio ubicado en Ammm Jordan, para determinar el comportamiento en un clima característico del mediterráneo. El análisis consistió en la simulación de un techo tradicional y un techo verde con 4 diferentes espesores (10 cm, 15 cm, 20 cm y 25 cm) para determinar la influencia del espesor en el comportamiento térmico.

Las simulaciones se realizaron para determinar los beneficios en el consumo de energía de enfriamiento y de calentamiento, así como total, además de su correspondiente ayuda en la reducción de emisiones de CO_2 y el efecto en el impacto ambiental. De tal manera que en los resultados obtenidos se puede apreciar el efecto positivo del techo verde en los diferentes meses del año en cuanto al consumo de energía, la estabilidad de temperaturas internas y el decremento de emisiones de CO_2, además de ayudar significativamente en el efecto de isla de calor urbano, además de mostrar una diferencia notable con respecto al techo tradicional ya que las emisiones de CO_2 se pueden reducir hasta un 5.8% y el consumo de energía hasta un 12.6%.

En este caso se hace la propuesta de hacer el estudio con EnergyPlus de una vivienda de interés social localizada en Pachuca, Hidalgo con la finalidad de tener la referencia de su comportamiento energético para posteriormente estar en condiciones de sugerir alternativas para mejorar la eficiencia energética de la vivienda.

2. METODOLOGÍA

2.1 Metodología de simulación en EnergyPlus

EnergyPlus es un software de simulación para realizar estudios de consumo de energía en construcciones, ya sea por calentamiento, enfriamiento, ventilación, iluminación y procesos de carga y descarga de agua usado en construcciones. Para poder llevar a cabo una simulación, resulta importante tener información que conlleve a realizar una simulación de forma satisfactoria, como puede ser: características climáticas de la ciudad donde se encuentre el edificio de estudio, características estructurales del edificio para definir la geometría general y especificaciones de las superficies, condiciones de uso del edificio como son: iluminación, uso de equipos y número de personas, información sobre control termostático y operación de sistemas HVAC.

Para el caso de estudio propuesto se establece la secuencia de simulación, partiendo de la definición de la geometría de la vivienda, asignación de superficies y materiales, designación de condiciones climáticas, selección de variables de salida y finalmente ejecución del programa para obtener los resultados requeridos, dicha secuencia se muestra en la Fig. 1.

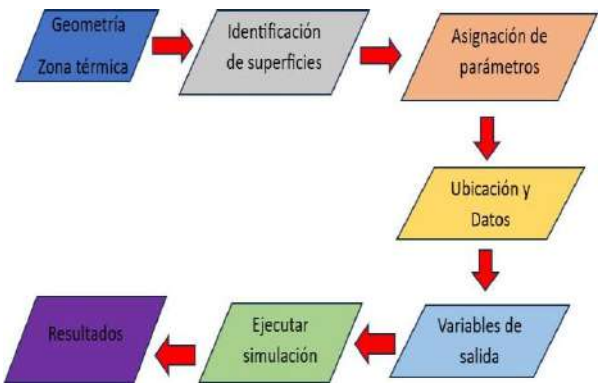


Fig. 1 Metodología de simulación

2.2 Descripción del caso de estudio

El problema planteado consiste en analizar el comportamiento térmico y energético de la envolvente de una casa de interés social ubicada en el fraccionamiento los tuzos de la zona conurbada de Pachuca y Mineral de la Reforma, para lo cual se realiza una simulación considerando el diseño estructural para determinar aspectos de comportamiento en consumo de energía, energía de calentamiento y enfriamiento y horas de confort. El fraccionamiento los tuzos forma parte de los fraccionamientos ubicados al sur de la ciudad de Pachuca, el cual se muestra en la Fig. 2

Fig. 2 Plano de distribución del fraccionamiento

La casa seleccionada es uno de los modelos predominantes del fraccionamiento los tuzos de la cual se muestra la fachada en la Fig. 3 que consta de un nivel y está conformada por las siguientes habitaciones: sala-comedor, cocina, baño, cubo-estudio y 2 recamaras.

Fig. 3 Fachada de la casa seleccionada

Los materiales implementados en los elementos estructurales de la casa son los siguientes:

Techo: revestimiento rojo terracota – losa de concreto – revoque yeso
Piso: losa de concreto – loseta
Paredes exteriores: revoque cemento – bloque de concreto – revoque yeso
Paredes interiores: revoque yeso – bloque de concreto – revoque yeso
Ventanas: vidrio claro de 3 mm
Puertas: madera

Considerando el número y distribución de habitaciones mostrados en la Fig. 4 así como la asignación de zonas térmicas por habitación Fig. 5 y los materiales empleados en la construcción de la vivienda se llevará a cabo la simulación del comportamiento energético de la misma y con ello poder establecer requerimientos que conlleven a una eficiencia energética en lo referente al consumo de energía natural y/o artificial.

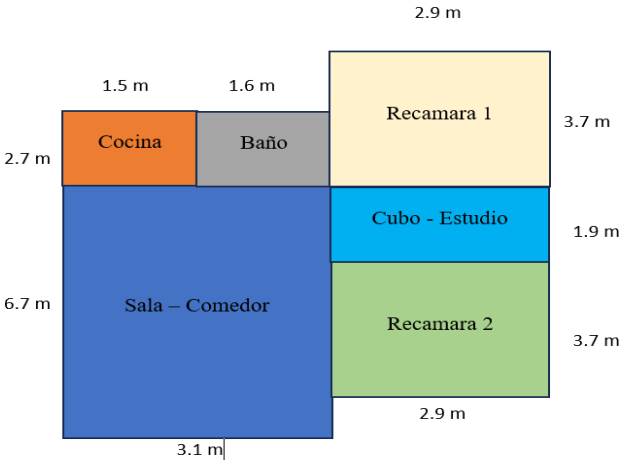


Fig. 4 Distribución de habitaciones

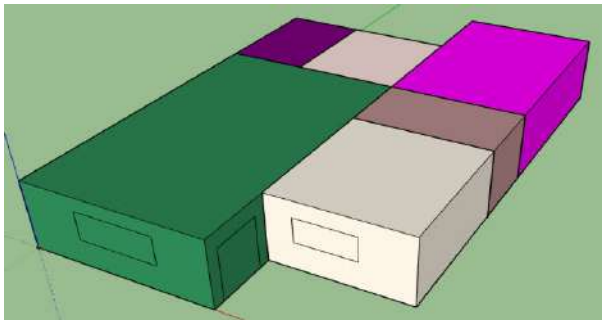


Fig. 5 Definición de zonas térmicas

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Para la obtención de los resultados, se procedió a realizar la metodología de simulación considerando el tipo de material que constituye cada uno de los elementos que conforman la envolvente de la vivienda, y proponiendo el análisis para el mes de abril
A continuación, se muestran los resultados obtenidos para habitaciones y paredes de la vivienda considerando 3 aspectos de análisis.

1) Un aspecto importante de análisis sería el **consumo de energía** que se puede tener en las habitaciones derivado de la ubicación de las habitaciones, considerando las energías necesarias de enfriamiento y calentamiento, esto se muestra en las Fig. 6 y 7

Sala – Comedor ------- Recamara 1 -------- Recamara 2 -----
Cocina ------ Baño ----- Cubo – Estudio -----

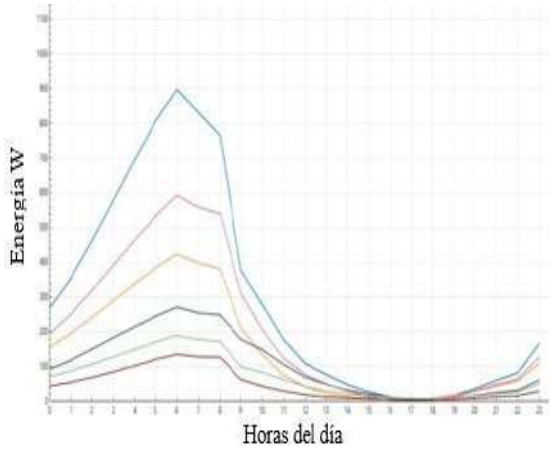


Fig.6 Energía de calentamiento en habitaciones

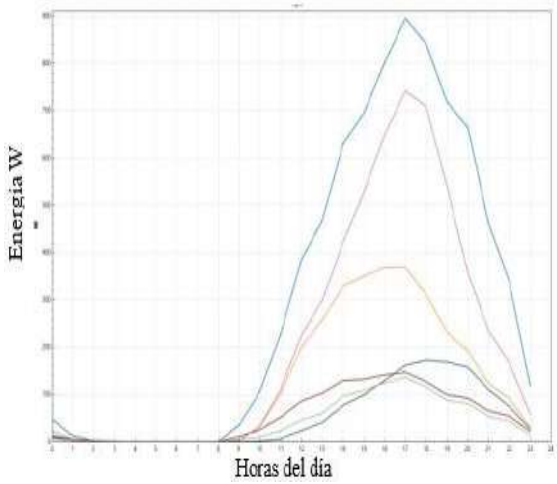


Fig. 7 Energía de enfriamiento en habitaciones

2)Otro aspecto para considerar es la influencia de las **condiciones de confort** por el gradiente de temperaturas entre las paredes lo cual afecta de manera directa en aspectos de calefacción y ventilación, este comportamiento se muestra en la Fig. 8 y 9.

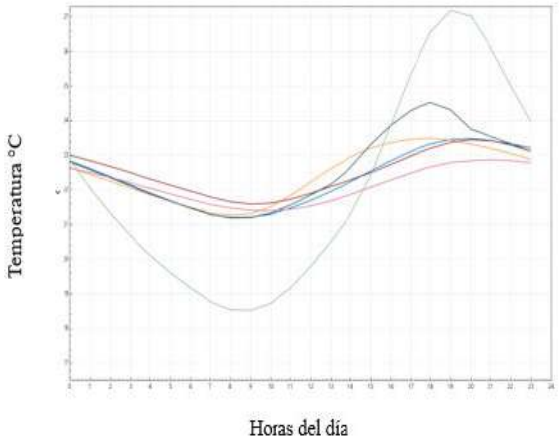


Fig. 8 Temperaturas paredes interiores

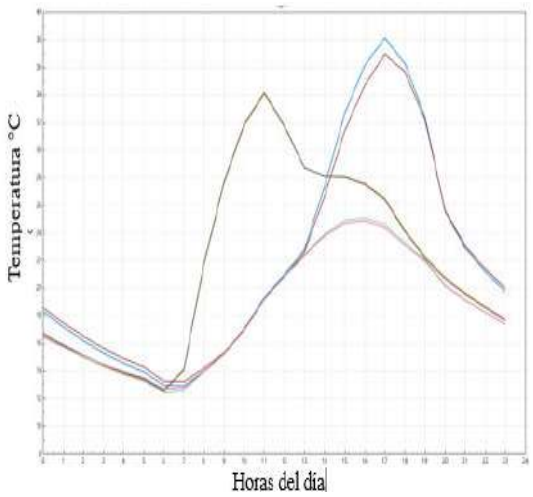


Fig. 9 Temperaturas paredes exteriores

3)También es importante considerar la influencia de la **radiación solar** en el techo lo cual afecta de manera directa en la absorción de energía calorífica, este comportamiento se muestra en la Fig. 10

Sala – Comedor ------- Recamara 1 ------- Recamara 2 -----
Cocina ------ Baño ----- Cubo – Estudio -----

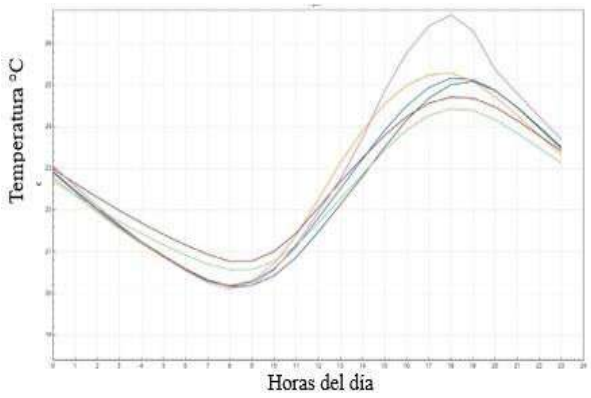


Fig. 10 Temperatura exterior en el techo

Con los resultados obtenidos se establece el consumo de energía necesarios para mantener las condiciones de confort mediante la energía requerida para enfriar y/o calentar la habitación y mantener las condiciones de confort interno, ya que podemos apreciar que habitaciones requieren ventilación y cuales calefacción, la Tabla 1 se muestra este comparativo de energía necesaria para cada habitación, con lo que se puede establecer la relevancia de la ubicación de la habitación y sus condiciones de ventilación natural pudiendo definir que habitaciones requieren la mayor y la menor cantidad de energía para enfriamiento y/o para calentamiento.

Tabla 1. Energía requerida por tipo de habitación.

Tipo de habitación	Energía de calentamiento W	Energía de enfriamiento W	Energía total W
Sala – Comedor	900	900	1800
Recamara 1	420	360	780
Recamara 2	120	140	260
Cocina	260	180	460
Baño	200	120	320
Cubo - Estudio	600	740	1340

4. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos de la simulación se puede establecer en primera instancia el efecto del tipo de material usado en los elementos de la envolvente y la afectación ocasionada por la irradiación solar, es decir hay que considerar las propiedades de éstos, de tal manera que la energía en especial calorífica no se transfiera en alta cantidad al interior de la vivienda y que además no se requiera de equipo de ventilación y/o refrigeración para mantener una zona de confort y por ende garantizar el rendimiento .

Podemos establecer también la relevancia de la distribución de las habitaciones ya que este es un factor importante para determinar los efectos de la radiación solar sobre las mismas repercutiendo en este sentido sobre la ganancia de calor, efecto de iluminación, temperatura de la zona y confort de los habitantes. Por tal motivo resulta primordial considerar el tipo de material, la ubicación climática y el diseño arquitectónico para ser considerados de forma adecuada para optimizar el rendimiento térmico de la vivienda.

Y finalmente se aprecia el comportamiento en requerimiento de energía para cada tipo de habitación, observándose cuál de ellas requiere la mayor y menor cantidad para mantener las condiciones de confort térmico, además de apreciar las temperaturas en el exterior e interior de las paredes que conforman la envolvente. Lo cual nos lleva a poder proponer medidas de mejora arquitectónica o estructural, modificación de materiales o implementación de ventilación-calefacción ya sea para una pared o habitación en particular y no necesariamente para toda la vivienda.

REFERENCIAS

Ávila-Hernández, A., Simá, E., Xamán, J., Hernández-Pérez, I., and Chagolla-Aranda, M.A. (2020). Test box experimental and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of residential building standard for Mexico. *Energy & Buildings,* volume (209), 109709.

Chagolla-Aranda, *M.A.* (2012). *Estudio de la demanda Energética, la calidad térmica y la calificación Energética de las viviendas en el estado de Morelos.* Tesis, Tecnológico Nacional de México.

Franco, A., Miserocchi, L., and Testi, D. (2023). Energy efficiency in shared buildings: Quantification of the potential at multiple scales. *Energy Reports*, volume (9), 84-95.

Magdy, M., Hamouda, M.R., Elhaida, O., and Mekhael, S. (2023). A novel and lean data based method to calculate the actual HVAC zone energy consumption and cooling load in sustainable smart cities using a single temperature sensor. *Energy Reports*, volume (9), 6502–6518.

Meseret, T. K., Girma, B. T., and Fitsum, T. (2021). Thermal zoning and window optimization framework for high rise buildings. *Applied Energy*, volume (292), 116894.

Qadourah, J. A. (2024). Energy efficiency evaluation of green roofs as a passive strategy in the mediterranean climate. *Results in Engineering*, volume (23), 102519.

Yua, S., Cui, Yumeng, Xu, X., and Feng, G. (2015) Impact of Civil Envelope on Energy Consumption Based on EnergyPlus. *Procedia Engineering*, volume (121), 1528 – 153.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Micro-scale wind assessment with commercial UAVs and IoT sensors for comfort and environmental management

Vázquez Ch, H*, Pachecano, L*, Moya S. L. *, Ascencio, J. A., Cruz-Sandoval, M****

** Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Colonia Palmira, CP 62490, México.*
(e-mail: m24ce094@cenidet.tecnm.mx , luisana.cp@cenidet.tecnm.mx , sara.ma@cenidet.tecnm.mx).

*** Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Santa Fe, Av Carlos Lazo 100, Santa Fe, La Loma, Álvaro Obregón, CP 01389, CDMX*
(e-mail: jascencio@tec.mx, cruzsandovalmarco@tec.mx)

Abstract: This study evaluates surface wind using commercial unmanned aerial vehicles and shows its effects when integrated with indoor and outdoor temperate and relative humidity from discrete sensors in a single-family dwelling in Emiliano Zapata, Morelos. The field protocol blends stationary hovering with short, segmented legs to capture both steady and evolving conditions, while the processing pipeline applies circular statistics, histograms, wind rose and fuses the wind record with temperature and humidity time series to derive comfort-relevant indicators. In a demonstrative camping on March 27, 2025, we obtained 182 valid samples, a mean wind speed of 1.03 m/s, a circular mean direction near 231 degrees, and 75.8 % of the observations within 0.5 – 2.0 m/s. Outdoor, the heat Index reached approximately 36 – 37 °C and the peak Vapor Pressure Deficit was about 5.3 kPa; indoors, we observed a thermal plateau around 31-32 °C with a Vapor Pressure Deficit near 3.2. – 3.4 kPa. Beyond numerical reporting, the combined view wind, temperature, and humidity provide actionable guidance for this dwelling, including preferential openings toward the south and southwest sectors when flows align, and nocturnal purge strategies during calmer evening conditions relax. The resulting dataset provides realistic boundary conditions for computational fluid dynamics, reducing guesswork at the inlet and aligning simulations with real conditions. Overall, the approach is reproducible with accessible hardware and low impact sensor networks, translating local measurements into decisions for thermal comfort, urban and agricultural microclimate management, distributed energy siting, and environmental stewardship, and is repeatable across days and seasons.

Keywords: Surface wind, (UAV) Unmanned Aerial Vehicles, discrete sensors, thermal comfort, computational fluid dynamics, agriculture.

1. INTRODUCCIÓN

La capa atmosférica superficial (0 – 100 m) influye directamente en el confort térmico y en actividades humanas productivas, por ejemplo: agricultura, dispersión de contaminantes, energía eólica. (Guevara D 2013; Oke T. R. 1987). Sin embargo, su medición in situ en entornos urbanos o periurbanos es compleja por la heterogeneidad del terreno y la variabilidad direccional. El uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) permite realizar muestreos a diferentes alturas y en diversos escenarios, mediante la operación en estado estacionario ("Hover"). La telemetría obtenida se procesa con algoritmos específicos para cada modelo, lo que permite estimar velocidad y dirección con sesgos controlables y comparables a instrumentación fija cuando se aplican correcciones aerodinámicas del vehículo.(Wetz et al. 2021).

Actualmente los UAV comerciales tienen como finalidad apoyar al usuario a realizar actividades controladas y automatizadas; por tal motivo, algunos equipos incorporan instrumentación especializada que mejora la reconstrucción del vector viento a partir de mediciones de presión (Hou et al. 2023) y matriz de corrección, útil para zonas cercanas al fuselaje y las corrientes inducidas por las propelas de los rotores. Estudios recientes han demostrado que plataformas cuadricóptero comerciales, pueden medir perfiles verticales de viento con una precisión comparable a torres instrumentadas y LIDAR Doppler, tanto en velocidad como en dirección. (Barbieri et al. 2019a; Wetz et al. 2021).

La medición precisa del viento mediante UAV permite identificar las corrientes predominantes que regulan el intercambio de aire entre el exterior y el interior. Estos flujos condicionan la ventilación natural y el balance térmico de los recintos.

El confort térmico se fundamenta en normas como ASHRAE 55 y la instrumentación recomendada por ISO 7726, que fijan los requisitos para medir temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y, cuando procede, la temperatura radiante media (ANSI/ASHRAE Standard 55-2020 2021).

Este estudio tiene como propósito medir y analizar el viento superficial mediante un modelo de UAV comercial, validar los resultados frente a instrumentación fija e integrar los registros térmicos y de humedad relativa obtenidos con sensores IoT. A

partir de estas mediciones, se calculan los índices de confort (HI y VPD) y se establecen criterios operativos que vinculan las variables dinámicas del viento con las condiciones higrotérmicas del entorno construido

Como parte de nuestro planteamiento consideramos que "el uso combinado de UAV y sensores IoT permitirá capturar con precisión los fenómenos locales de viento y confort térmico, aportando información que actualmente no está disponible en fuentes meteorológicas convencionales, para un diagnóstico localizado.

El estudio se realizó en la zona sur del estado de Morelos, México, a microescala localizada (≤ 100 m) alrededor de una vivienda representativa de fraccionamiento periurbano. Este ámbito captura el campo de viento inmediato que acciona sobre el área de estudio y el análisis térmico del exterior e interior del habitáculo de estudio.

Fecha de monitoreo: 27 de marzo del 2025, representativa de la fase previa al periodo de mayor carga térmica y disconfort ambiental en la región.

2. METODOLOGÍA

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

Localización: Emiliano Zapata, Morelos; altitud reportada en la revista municipal aproximada a 1,249–1,272 m, sobre el nivel del mar, coordenadas WGS84 [18.831490, -99.200446]. El entorno del área de estudio se clasifica como un fraccionamiento habitacional, con vialidades secundarias, vegetación dispersa, rugosidad heterogénea.
La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través de su sitio web, reporta, mediante la estación meteorológica de Temixco, siendo la más cercana al área de estudio; valores mensuales en marzo de 2025 de temperatura máxima media de 36.5 °C y mínima media de 29.7 °C. Esta limitada densidad de estaciones en el estado ha sido señalada previamente por (Uribe Indalecio 2018) , quien recomienda campañas anemométricas in situ para validar proyecciones antes de la toma de decisiones en proyectos eólicos.

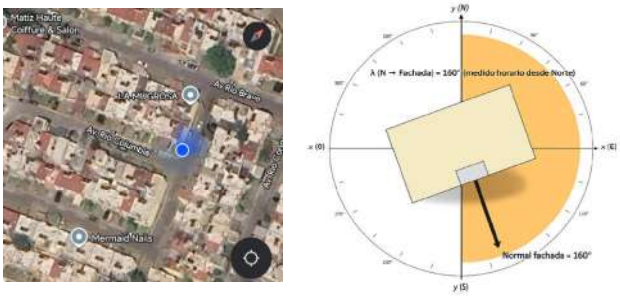


Figura 1 Orientación de caso de estudio y vista de desarrollo inmobiliario

La figura 1 muestra la orientación de fachada principal, resaltada con el cuadro interior gris, que integra puerta y ventanas de ventilación, está orientada 160° respecto al norte (SSE). Debido a su orientación y el recorrido solar durante el año, la fachada, techo y pared este, presentan altas ganancias por radiación.

Puntos de medición: exterior (jardín) e interior (sala).
El punto exterior se ubicó frente a la fachada principal, con el propósito de obtener una referencia directa del flujo de aire incidente sobre la vivienda. El sensor interior se instaló en el centro de la sala, a 1.2 m del piso y alejado de muros o fuentes directas de calor, siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 7726. Esta disposición permite comparar el comportamiento térmico entre el ambiente exterior y el interior habitable, estableciendo una referencia útil para analizar la influencia del viento en la ventilación natural y el confort térmico.

2.2 MEDICIÓN DE VIENTO CON UAV — TÉCNICA DE COMPENSACIÓN DE EMPUJE

En "Hover" o punto fijo, mediante vuelos segmentados cortos a baja velocidad, el dron compensa el empuje del viento para sostenerse y cumplir con la posición seleccionada. Esa compensación se refleja en el esfuerzo diferencial de los rotores. El vector de viento queda opuesto al vector de compensación. Estos métodos están reportados como dinámico-modelo/attitude-based y alcanzan buena exactitud si se calibra con referencia externa.(Meier et al. 2022a).

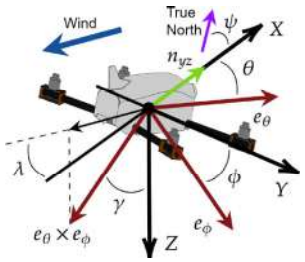


Figura 2 Diagrama de cuerpo libre de fuerzas aplicada a un dron durante vuelo. (Segales et al. 2020)

Para (Segales et al. 2020), la técnica de empuje se explica en la Figura 2. La flecha azul sigue la convención meteorológica (dirección desde donde sopla el viento). Los ejes negros X–Y–Z corresponden al marco terrestre local del UAV, North–East–Down (N–E–D). La flecha morada marca el Norte verdadero y el ángulo ψ indica el rumbo del dron. Las flechas rojas e_θ, e_ϕ representan los vectores unitarios del marco del dron que, en conjunto, definen su plano "suelo"; en el instante mostrado, el UAV está inclinado. La flecha verde es el vector normal a ese plano (vector de inclinación): si el dron está nivelado, coincide con Z; cuanto mayor la inclinación (γ) necesaria para sostenerse, mayor el viento incidente. El ángulo λ es el rumbo de esa inclinación en el plano horizontal. Como el dron se inclina contra el viento, la proyección horizontal de la flecha verde invertida da el rumbo del viento, de forma aproximada: rumbo del viento = λ + 180°, (medido respecto al Norte verdadero).

La literatura especializada documenta validaciones cruzadas entre estimaciones de viento obtenidas con UAV y registros de torres meteorológicas, con concordancias consistentes y sesgos controlados bajo condiciones de vuelo estable.

A continuación, se presentan los rangos clave evaluados, incluidas aquellas que discuten limitaciones y fuentes de error.

- (Segales et al. 2020).
  En comparación contra la torre Mesonet (10 m), CopterSonde alcanzó ±0.6 m/s de exactitud en velocidad y una diferencia típica en dirección ≤ 4°, tras calibración y verificación en vuelos de "Hover" localizado.
- (Meier et al. 2022).
  DJI Phantom 4 vs torre MoTUS. Método "tilt" (hover): sesgo 0.15 m/s, σ = 0.70–0.93 m/s. Modelo dinámico lineal: sesgo 0.29–0.46 m/s, σ = 0.82–1.08 m/s. Dirección: buen acuerdo cualitativo.
- (Barbieri et al. 2019b) (LAPSE-RATE).
  Contra la torre MURC (18 m), los UAV (3DR Solo, DJI Inspire 2) presentaron diferencia media en velocidad 0.22 ± 0.59 m/s y en dirección 5.09 ± 14.07°.
- (Shelekhov et al. 2021).
  Analizaron variaciones temporales de los componentes longitudinal y transversal del viento con AMK-03 sónica y DJI Mavic Mini (campañas del 24 jul y 12 ago 2020), aportando evidencia sobre dinámica de componentes más que sobre métricas agregadas de error tradicional.

2.3 EQUIPOS UTILIZADOS

2.3.1 UAV- MONITOREO DE VIENTO

El mercado de los vehículos aéreos no tripulados se ha diversificado con rapidez. En este contexto, DJI ha mantenido una línea consistente al ofrecer plataformas orientadas a la educación y uso industrial, con controles inteligentes que simplifican la operación. Sus equipos permiten planificar misiones automáticas, gestionar sensores/cámara, aprovechar aplicaciones de soporte para programar tareas, registrar telemetría, garantizando vuelos más seguros y precisos.

En este estudio empleamos un DJI Mavic Air 2, que registra de forma automática los datos esenciales del vuelo: hora, posición (latitud, longitud y altura), velocidades sobre el plano del suelo (componentes norte, este y vertical), actitud del dron (inclinación y rumbo) y metadatos operativos.

Dado que en esta familia de equipos (DJI Mavic) la telemetría no se expone directamente el régimen de los motores (RPM/torque), la estimación del viento se obtuvo mediante AirData, servicio que procesa los vuelos del dron, (Contenido/Funciones por suscripción). El sistema integra la postura de la aeronave, el esfuerzo de estabilización y la trayectoria de vuelo para derivar, muestra a muestra, la velocidad y la dirección del viento.
En términos prácticos: el dron "siente" el viento a través de su inclinación y controles; AirData traduce esa respuesta en números reproducibles que utilizamos en el análisis.

Figura 3 Referencia de Interfaz AirData app.

La reproducibilidad del procedimiento se garantiza mediante el uso de la plataforma AirData, que identifica el perfil aerodinámico de cada aeronave y aplica algoritmos de compensación específicos. Esto permite replicar las condiciones de vuelo y procesamiento entre equipos del mismo modelo, asegurando consistencia y comparabilidad entre campañas.
Los parámetros operativos se definieron según las capacidades del UAV y la autonomía de su batería. La telemetría procesada por AirData cada 5 segundos permite captar ráfagas y calmas. Se usaron vuelos de 15 min útiles para garantizar seguridad, integridad del equipo y coherencia experimental entre campañas.

2.3.2 SENSORES IoT- PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA / HUMEDAD RELATIVA

Para el monitoreo termo-higrométrico utilizamos un sensor Wi-Fi con pantalla (Steren SHOME-180), una opción IoT no invasiva que puede instalarse sin cableado ni obras y que reporta temperatura y humedad en tiempo real vía red 2.4 GHz. El equipo ofrece notificaciones remotas, automatizaciones con otros dispositivos inteligentes historial y gráficas por día/mes desde la aplicación Steren Home y visualización local en su pantalla de 2.5".

Descripción técnica:
Alimentación: 4.5 V-(3 x AAA)
Frecuencia: 2.4 GHz
Humedad de trabajo: 0% – 99.9% no condensada
Temperatura de trabajo: -10 °C – 55 °C
Lapso de reporte de temperatura y humedad: 60s
Corriente de reposo: ≤ 30 uA
Corriente de alarma: ≤ 35 mA
Precisión de la temperatura: ±0,3 °C
Precisión de la humedad: ± 3%

2.4 VALIDACIÓN – DATOS VIENTO

Para evaluar la consistencia del método de estimación, se llevó a cabo una validación experimental cruzada con el objetivo de comparar las lecturas obtenidas mediante la aplicación de gestión AirData, frente a los registros de una estación meteorológica fija perteneciente al

Departamento de Mecánica del CENIDET. Utilizada en los trabajos de investigación que validan su funcionamiento con diversas técnicas: (Coello-Sánchez. 2025), (Estrada Z 2025), (Báez G 2025) y (Ávila H, 2023).

La estación meteorológica utilizada registra datos cada 3 segundos, generando un promedio cada 10 minutos. Para esta validación, los vuelos se realizaron en un intervalo comprendido entre las 10:00 y las 10:25 horas, permitiendo así contar con dos segmentos de datos promediados por parte de la estación meteorológica para su comparación directa con los valores medidos durante el vuelo. (Palomaki et al. 2017).

Fecha	Hora	Dirección Promedio (°)	Velocidad Promedio (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)	Status
2/20/25	***10:10***	***216***	***1.24***	***4.0***	***VALID***
2/20/25	***10:20***	***235***	***1.79***	***4.0***	***VALID***

Tabla 1 Datos Estación Meteorológica CENIDET

Los vuelos realizados por el dron obtuvieron los siguientes datos:

Hora	No. Lecturas	Velocidad Promedio (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)	Dirección Promedio (°)
10:10:00	***231***	***1.2***	***4.1***	***208***
10:20:00	***205***	***1.8***	***4.0***	***228***

Tabla 2 Datos AirData - Mavic Air 2

Comparativa:

Hora	Variable	Estación	Dron	Error Abs.	Error Relativo
10:10	Velocidad PROM. (m/s)	1.24	1.20	0.05	3.69 %
	Ráfaga máx. (m/s)	4.00	4.10	0.10	2.50 %
	Dirección (°)	216	208	8	3.70 %
10:20	Velocidad PROM. (m/s)	1.78	1.80	0.01	0.78 %
	Ráfaga máx. (m/s)	4.00	4.00	0.00	0.00 %
	Dirección (°)	235	228	7	2.98 %

Tabla 3 Resultado de error Estación vs. Mavic Air 2

La comparación directa el dron DJI Mavic con la estación fija permitió cuantificar la incertidumbre global del sistema, obteniéndose discrepancias promedio de ±0.03 m/s en velocidad, ±7.5° en dirección. Estos valores son coherentes con los reportados por Wetz et al. (2021) y Meier et al. (2022b), confirmando la confiabilidad del método para estudios de viento en microescala urbana.

2.5 VALIDACIÓN – DATOS TEMPERATURA / HUMEDAD RELATIVA

Se contrastó el desempeño de los sensores Wi-Fi de T/HR contra el módulo de referencia ensamblado en CENIDET por (E.S. Aguilar-Cayetano). Ambos instrumentos se ubicaron en un área común del Campus Palmira MIM, fecha de monitoreo fue el 23 de marzo de 2025, registrando temperatura y humedad relativa en paralelo. El sistema de referencia del CENIDET opera a una cadencia nominal de 4 segundos, es decir, 900 muestras por hora. En la campaña de monitores de seis horas se obtuvieron 5,400 registros válidos, para el análisis, los datos de promedio horario sirven para construir el segmento de seis horas, manteniendo la misma ventana temporal en ambos sistemas.

Hora	T. Arduino (°C)	HR Arduino (%)	Temp. Sensor Domótica (°C)	HR. Sensor Domótica (%)
07:00 a. m.	27.54	34.82	27.40	35.00
08:00 a. m.	27.64	34.94	27.40	35.00
09:00 a. m.	27.87	34.29	27.50	34.00
10:00 a. m.	28.04	34.05	27.70	34.00
11:00 a. m.	28.26	33.69	28.00	34.00
12:00 p. m.	28.55	32.86	28.30	33.00

Tabla 4 Comparativa Sensor IoT vs. Sensor de Referencia CENIDET MIM.

Datos registrados y errores absolutos calculados a partir de las mediciones experimentales.

Hora	T-Ard. (°C)	T-SDom. (°C)	Error Temp Abs. (°C)	HR Ard. (%)	HR SDom. (%)	Error HR Abs. (%)
07:00 a. m.	27.54	27.4	0.14	34.82	35	0.18
08:00 a. m.	27.64	27.4	0.24	34.94	35	0.06
09:00 a. m.	27.87	27.5	0.37	34.29	34	0.29
10:00 a. m.	28.04	27.7	0.34	34.05	34	0.05
11:00 a. m.	28.26	28	0.26	33.69	34	0.31
12:00 p. m.	28.55	28.3	0.25	32.86	33	0.14
Promedio			0.27			0.17

Tabla 5 Tabla de análisis de error absoluto entre sensores

Durante la validación, ambos equipos mostraron altos niveles de concordancia: el error promedio fue de ±0.27 °C en temperatura y ±0.17 % en humedad relativa, cifras dentro del margen de precisión nominal de ambos instrumentos. Estas diferencias mínimas confirman la fiabilidad del sensor IoT para monitoreo climático y su potencial como herramienta de apoyo para campañas de confort térmico, domótica residencial y proyectos educativos.

2.6 VUELOS ESTACIONARIOS

Se eligió la altura de 12 metros con la finalidad de evitar los elementos constructivos e interferencias mecánicas del entorno inmediato (vegetación, muros,
y sistemas de almacenamiento de agua) permitiendo capturar el viento libre sobre la cubierta urbana.

Durante la sesión de medición, el DJI Mavic Air 2 permaneció en vuelo estacionario durante 15 minutos sobre un punto fijo registrando una muestra cada 5 s (aproximadamente 180 registros por vuelo).

El control de error se aseguró manteniendo la aeronave en modo Hover, evitando perturbaciones aerodinámicas asociadas a desplazamientos horizontales y verticales. Este modo de operación, documentado por Segales et al. (2020) y Wetz et al. (2021), ofrece la mayor estabilidad para estimar velocidad y dirección del viento mediante UAV.

Para el procesamiento y graficación de los datos de ambas herramientas de monitoreo se utilizó el Software RSTUDIO, aplicando los siguientes pasos:

- Filtrado de valores atípicos y muestras perdidas
- Interpolación lineal temporal donde fue necesaria
- Cálculo de estadísticos descriptivos: media, mediana, percentiles (p5, p25, p75, p95)
- Generación de gráficos:
- Serie de velocidad vs tiempo
- Serie de dirección (desenrollada)
- Histograma de frecuencia relativa
- Rosa de viento (30° por sector)

Cada gráfico permite analizar la variabilidad temporal y espacial del viento en microescala.
tendencias

3. RESULTADOS

3.1 ANÁLISIS DE VIENTO

Figura 4 Grafica Velocidad del viento vs. Tiempo. vuelo 27 de marzo del 2025

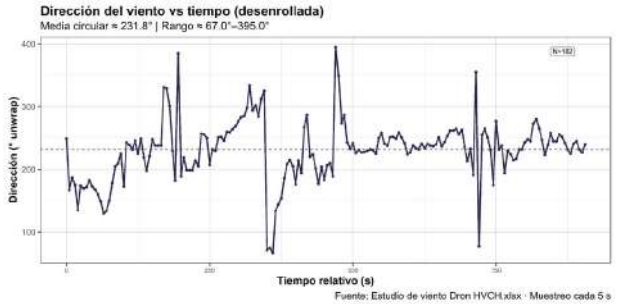


Figura 5 Grafica Dirección del viento vs Tiempo. Vuelo 27 de marzo del 2025

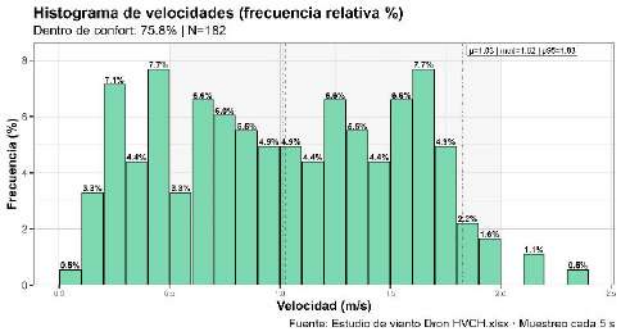


Figura 6 Histograma de Frecuencias de viento vs. la Velocidad del viento monitoreada. Vuelo de marzo del 2025

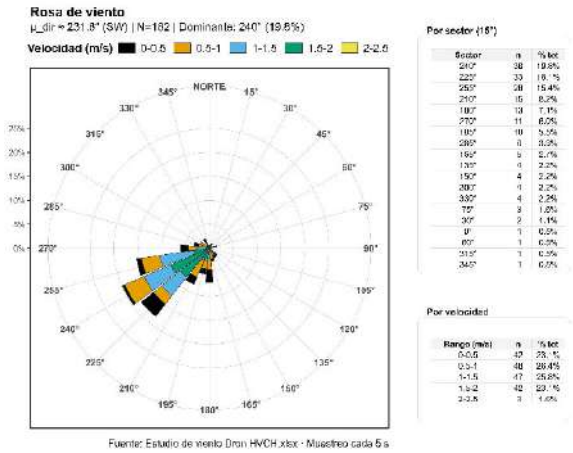


Figura 7 Rosa de vientos. Vuelo 27 de marzo del 2025.

La velocidad (U) y la dirección (θ) se midieron cada 5 segundos, generando una serie de 180 muestras por vuelo. A partir de estos datos se calcularon los estadísticos turbulentos: media ($\bar{U}$) desviación estándar (σ_U) intensidad turbulenta (I_U) e índice de ráfaga (G) conforme a las recomendaciones de la WMO (2008) y la formulación de Stull (1988) para flujos atmosféricos cercanos a superficie.

La dirección media se evaluó mediante estadística circular (Fisher, 1993), considerando la naturaleza angular de los datos, y se obtuvieron las componentes horizontales u, v necesarias para la representación vectorial del flujo.

Las ecuaciones (2)–(5) expresan el conjunto de operaciones aplicadas sobre los datos de viento medidos con el UAV

1. $\overline{U} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} U_i,$

2. $\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(U_i - \overline{U}\right)^2}$

3. $I_u = \frac{\sigma_U}{\overline{U}}\ G = \frac{U_{max}}{\overline{U}}$

4. $\overline{\theta} = atan2\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} sin\theta i\,, \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} cos\theta i\right), R = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} cos\theta i\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} sin\theta i\right)^2}$

5. $\sigma_\theta = \sqrt{-2\ln R,}$

$$u = U\cos\theta\,, \qquad v = U\sin\theta$$

3.2 ANÁLISIS DE TEMPERATURA / HUMEDAD RELATIVA

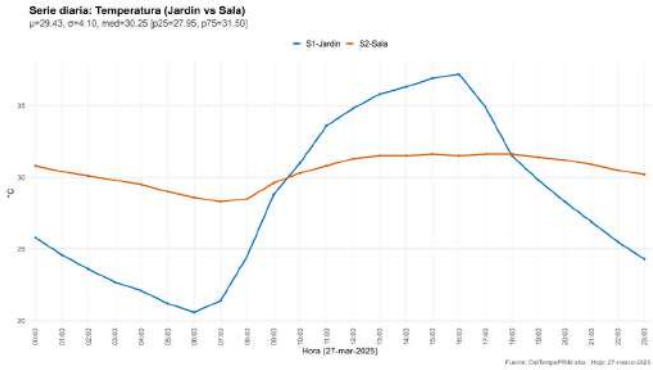


Figura 8 Grafico de Temperatura 27 de marzo del 2025. Comparativa Interior y exterior

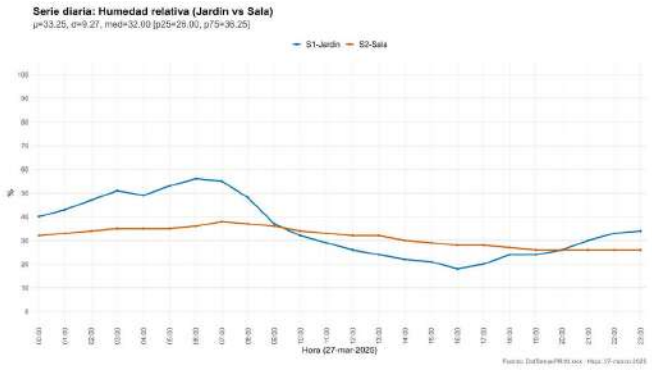


Figura 9 Grafico de HR % 27 de marzo del 2025. Comparativa Interior y exterior

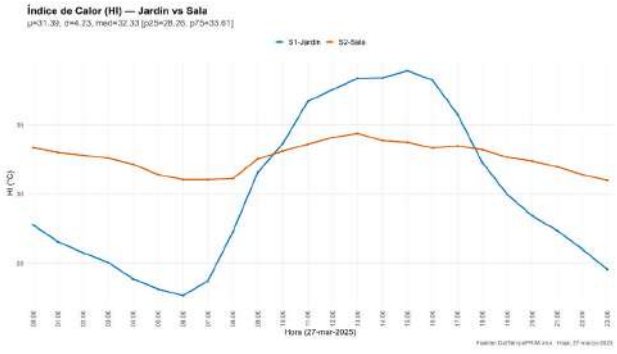


Figura 10 Grafica de sensación térmica 27 de marzo del 2025. Comparativa Interior y exterior

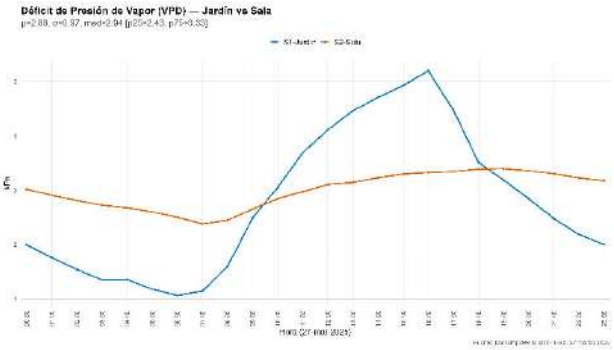


Figura 11 Grafica Déficit de presión o capacidad de secado 27 de marzo del 2025. Comparativa Interior y exterior

Para el análisis termo-higrométrico se emplearon mediciones simultáneas de temperatura del aire (T_a) y humedad relativa (obtenidas en los sensores interiores y exteriores).
A partir de estos registros se calcularon las variables psicrométricas derivadas, presión de saturación de vapor (p_{sat}) , presión real de vapor (p_a) , déficit de presión de vapor (VPD) y punto de rocío (T_d) siguiendo la formulación empírica de Magnus-Tetens (FAO-56, Allen et al., 1998), recomendada por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) e ISO 7726 para aplicaciones de confort térmico.

Adicionalmente, se estimó el Índice de Calor *(HI)* según el modelo polinómico de (NOAA & W.R.N 2024), válido para (T_a)>26°$C y RH$>40%, con el fin de representar el efecto combinado de temperatura y humedad sobre la sensación térmica percibida.
Las ecuaciones (a)–(g) describen las relaciones empleadas y permiten obtener las magnitudes necesarias para caracterizar el microclima interior y exterior de la vivienda.

a) $p_{\mathrm{sat}}(T_a) = 0.6108\, exp\left(\frac{17.27 * T_a}{T_a + 237.3}\right)$

b) $p_a = \frac{\mathrm{RH}}{100}\, p_{\mathrm{sat}}(T_a)$

c) $\mathrm{VPD} = p_{\mathrm{sat}}(T_a) - p_a$

d) $\gamma = \frac{17.27 * T_a}{T_a + 237.3} + ln\left(\frac{\mathrm{RH}}{100}\right)$

e) $T_d = \frac{237.3\,\gamma}{17.27 - \gamma}$

f) $HI_F = -42.379 + 2.04901523\,T_F + 10.14333127\,\mathrm{RH} - 0.22475541 T_F\, RH - 6.83783 \times 10^{-3}\, T_F^2 - 5.481717 \times 10^{-2}\,\mathrm{RH}^2 + 1.22874 \times 10^{-3} T_F^2 RH + 8.5282 \times 10^{-4}\, T_F \mathrm{RH}^2 - 1.99 \times 10^{-6}\, T_F^2 \mathrm{RH}^2$

g) $HI = \frac{HI_F - 32}{1.8}, \qquad T_F = 1.8\,T_a + 32$

4. DISCUSIÓN

Viento (UAV, vuelo estacionario 15 min; Δt = 5 s). La serie muestra μ = 1.03 m/s, σ = 0.54 m/s, p95 = 1.83 m/s y 75.8 % del tiempo en 0.5–2.0 m/s (confort). La dirección media =

231.8° (S–SW), coherente con brisas térmicas locales (Ilustración 4, 5, 6, 7). La validez del enfoque por compensación de empuje/actitud con multirrotor y su concordancia con referencias fijas bajo vuelo estable, se muestra como una herramienta validada y replicable.(Palomaki et al. 2017; Meier et al. 2022b; Wetz et al. 2021).

Las series termo-higrométricas (IoT). En las mediciones vespertinas, la temperatura exterior alcanzó aproximadamente 37–38 °C por la tarde; mientras que el interior se estabilizó entre 31–32 °C. La humedad relativa exterior descendió a 18–33 %, en tanto que el interior se mantuvo 28–30 %. El HI y el VPD confirman mayor carga térmica (Rangos fuera de mapas de confort) vespertina (Figuras: 10, 11), con cálculos y umbrales conforme a (ANSI/ASHRAE Standard 55-2020 2021).

Diferenciales interiores / exteriores. ΔT: positivo de madrugada (+5 a +7 °C) y negativo en tarde (−4 a −5 °C). ΔHR: interior más seco temprano (−10 a −20 %) y cercano a 0 al atardecer (ilustración 8 y 9). Este cruce, junto con el viento Sur–Sur Este, sugiere ventilación cruzada operativa por la mañana; sombra + ventilación controlada en tarde, en línea con criterios de confort adaptativo (ASHRAE 55, 2021).

5. CONCLUSIONES

La combinación del uso de UAV en modo estacionario (“Hover”) con los sensores IoT permitió reconocer el comportamiento del viento en microescala y su acoplamiento termo-higrométrico de forma no invasiva y reproducible, adecuada para fines de diagnóstico(Meier et al. 2022a; Palomaki et al. 2017).

Con μ =1.03 m/s y dirección aproximada 232°, el sitio presenta condiciones favorables para ventilación natural gran parte del tiempo (75.8 % en 0.5–2.0 m/s). (ANSI/ASHRAE Standard 55-2020 2021).

El patrón diario ΔT y ΔHR respalda aperturas dirigidas por periodo (barrido matutino S–SW; sombra + ventilación controlada en tarde) bajo criterios ASHRAE 55.

En conjunto, los criterios operativos, la reproducibilidad del procedimiento y la evaluación de incertidumbre consolidan una metodología robusta, adaptable a distintos equipos y contextos, que permite obtener mediciones confiables del viento superficial para aplicaciones de confort térmico y herramientas de simulación.

Aunque la naturaleza estocástica del viento impide su reproducción exacta entre jornadas, pero el protocolo experimental establecido resulta plenamente reproducible desde el punto de vista metodológico. La definición rigurosa de las condiciones operativas, la calibración cruzada con sensores fijos y la aplicación uniforme de algoritmos de procesamiento confieren trazabilidad y consistencia a los resultados, permitiendo comparaciones válidas entre campañas y contextos urbanos similares.

SUGERENCIA DE LA METODOLOGÍA. Basada en criterios de: (Meier et al. 2022b; Palomaki et al. 2017):

- Representatividad temporal: repetir mediciones en varios días y cubrir ventanas horarias (mañana–tarde–noche); ideal campañas estacionales para capturar variabilidad climática.
- Perfiles de altura: ejecutar Hover a 2–4 m, 6–8 m, 12–15 m, 20–25 m y niveles superiores hasta la altura máxima permitida por el UAV y la norma local.
- Calibración y validación continua: calibración local y mantener validación con referencia fija.

ÁREAS DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA:

- Confort térmico y arquitectura bioclimática: Orientación de aperturas según sector dominante.
- Agricultura de precisión: Ventanas de baja deriva (velocidad y VPD) para riego/fertirriego.
- Energía distribuida y microrredes: Prefactibilidad eólica micro- aerogeneradores con rosa y percentiles locales.
- Gestión ambiental y seguridad: Evacuación y rutas seguras según sector de viento dominante (dispersión de humo/polvo).
- Planeación urbana y resiliencia: Corredores de ventilación basados en la rosa micro-local.
- Gestión y control de incendios (urbano/vegetación): Predicción de propagación local.
  Ventanas seguras para contrafuego y ataque inicial.
  Ubicación de cortafuegos, anclajes y rutas de evacuación: trazar líneas en barlovento.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dra. Karla Valenzuela Ocaña y al Dr. Iván García Kerdán por su apoyo como parte del ITESM CSF con equipo y asesoría especializada. Dr. Efraín Simá Moo, Maestro Hugo Coello Sánchez Ing. Eleazar Sergio Aguilar Cayetano gracias por el apoyo y acceso a datos de los instrumentos de referencia del Departamento de Ingeniería Mecánica de CENIDET. de validación de los instrumentos.

GLOSARIO TÉCNICO DE VARIABLES

- T_a— **Temperatura del aire** [°C].
  Temperatura medida en el punto (interior/exterior).
- RH— **Humedad relativa** [%].
  Rango: 0–100 %.
- $p_{\mathrm{sat}}(T_a)$— **Presión de saturación de vapor** [kPa].
  Calculada con Magnus–Tetens; aumenta exponencialmente con T_a.
- p_a— **Presión de vapor real** [kPa].
  $p_a = (RH/100)\, p_{\mathrm{sat}}(T_a)$.
- VPD— **Déficit de presión de vapor** [kPa].
  $\mathrm{VPD} = p_{\mathrm{sat}} - p_a$. *Termo-higrometría y confort/estrés de secado*. Exterior cálido-seco puede dar 2–6 kPa.
- γ— **Término auxiliar de punto de rocío** [adimensional].
  $\gamma = \frac{17.27 T_a}{T_a + 237.3} + \ln(RH/100)$.
- T_d— **Temperatura de punto de rocío** [°C].
  Temperatura a la que el aire satura manteniendo p_aDensidad constante.

- T_F— **Temperatura del aire en °F** [°F]. $T_F = 1.8\,T_a + 32$. *Sólo para índice de calor Rothfusz.*
- HI_F— **Índice de calor (forma en °F)** [°F]. Polinomio de Rothfusz (NOAA) en función de T_F y $RH(\%)$.
- HI— **Índice de calor (convertido a °C)** [°C]. $HI = (HI_F - 32)/1.8$. *Úsalo típicamente para* $T_a \gtrsim 26°C$ *y* $RH \gtrsim 40\%$.
- ΔT— **Diferencial térmico int-ext** [°C]. $\Delta T = T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}$.
- ΔRH— **Diferencial de HR int-ext** [%]. $\Delta RH = RH_{\text{int}} - RH_{\text{ext}}$.
- ΔVPD— **Diferencial de VPD int-ext** [kPa]. $\Delta\text{VPD} = \text{VPD}_{\text{int}} - \text{VPD}_{\text{ext}}$.
- $\mu, \sigma, p_5, p_{50}, p_{95}$— **Estadísticos**. Media, desviación estándar y percentiles sobre las series T/HR/HI/VPD.

2) Viento (vuelo estacionario ~11 m, $\Delta t = 5$s)

- U— **Velocidad instantánea de viento** [m s $^{-1}$]. Medición del sensor (dron/estación).
- θ— **Dirección del viento** [°] *(de donde sopla)*. Para trigonometría, usar θ_{rad}en radianes.
- N— **Número de muestras** [–]. En 15 min con $\Delta t = 5\text{s} \rightarrow N \approx 180$.
- $\bar{U}$— **Velocidad media** [m s $^{-1}$]. $\bar{U} = \frac{1}{N}\sum U_i$.
- σ_U— **Desviación estándar de velocidad** [m s $^{-1}$]. Variabilidad de la serie a 5 s.
- I_u— **Intensidad turbulenta** [–]. $I_u = \sigma_U/\bar{U}$. *Típico urbano*: 0.1–0.4.
- $U_{\max}$— **Ráfaga máxima** [m s $^{-1}$]. Máximo instantáneo en la ventana.
- G— **Índice de ráfaga (gust factor)** [–]. $G = U_{\max}/\bar{U}$.
- $\bar{C}, \bar{S}$— **Medias trigonométricas** [–]. $\bar{C} = \frac{1}{N}\sum\cos\theta_i, \bar{S} = \frac{1}{N}\sum\sin\theta_i$.
- $\bar{\theta}$— **Dirección media circular** [° o rad]. $\bar{\theta} = \text{atan2}(\bar{S}, \bar{C})$.
- R— **Longitud resultante normalizada** [–]. $R = \sqrt{\bar{C}^2 + \bar{S}^2}$. *Coherencia direccional (0–1).*
- σ_θ— **Dispersión direccional** [rad]. $\sigma_\theta = \sqrt{-2\ln R}$.
- u, v— **Componentes horizontales** [m s $^{-1}$]. $u = U\cos\theta, v = U\sin\theta$(con θen rad si usas trig).
- t_s— **Paso de muestreo** [s]. Aquí $t_s = 5$s.

REFERENCIAS

ANSI/ASHRAE Standard 55-2020. (2021). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Available from: www.ashrae.org.

Avila H, A. (2023). Tecnológico Nacional de México Tesis de Doctorado [unpublished]. CENIDET.

Báez G, W.G. (2025). Tesis de Doctorado-Estudio del comportamiento térmico de un edificio no residencial con Fachada Verde [unpublished]. CENIDET.

Barbieri, L. et al. (2019a). Intercomparison of small unmanned aircraft system (sUAS) measurements for atmospheric science during the LAPSE-RATE campaign. Sensors (Switzerland), 19(9).

Barbieri, L. et al. (2019b). Intercomparison of small unmanned aircraft system (sUAS) measurements for atmospheric science during the LAPSE-RATE campaign. Sensors (Switzerland), 19(9).

Coello-S., H. (2025). Tecnológico Nacional de México Tesis de Maestría [unpublished]. CENIDET.

Estrada Z, A.I. (2025). Tecnológico Nacional de México [unpublished]. CENIET.

Guevara D, M.J. (2013). Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica Quantification of the Profile Wind up 100m from Surface and its Incidence in Air Climatology. Revista Terra Volumen XXIX, 46.

Hou, T., Xing, H., Gu, W., Liang, X., Li, H. and Zhang, H. (2023). Wind Pressure Orthogonal Decomposition Anemometer: A Wind Measurement Device for Multi-Rotor UAVs. Drones, 7(6).

Meier, K., Hann, R., Skaloud, J. and Garreau, A. (2022a). Wind Estimation with Multirotor UAVs. Atmosphere, 13(4).

Meier, K., Hann, R., Skaloud, J. and Garreau, A. (2022b). Wind Estimation with Multirotor UAVs. Atmosphere, 13(4).

Oke T. R. (1987). Boundary Layer Climates.

Palomaki, R.T., Rose, N.T., van den Bossche, M., Sherman, T.J. and Wekker, S.F.J. De. (2017). Wind Estimation in the Lower Atmosphere Using Multirotor Aircraft. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 34, pp.1183–1191. Available from: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:125443708.

Segales, A.R., Greene, B.R., Bell, T.M., Doyle, W., Martin, J.J., Pillar-Little, E.A. and Chilson, P.B. (2020). The CopterSonde: An insight into the development of a smart unmanned aircraft system for atmospheric boundary layer research. Atmospheric Measurement Techniques, 13(5), pp.2833–2848.

Shelekhov, A.P., Afanasiev, A.L., Shelekhova, E.A., Kobzev, A.A., Tel'minov, A.E., Molchunov, A.N. and Poplevina, O.N. (2021). Using Small Unmanned Aerial Vehicles for Turbulence Measurements in the Atmosphere. Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics, 57(5), pp.533–545.

Wetz, T., Wildmann, N. and Beyrich, F. (2021). Distributed wind measurements with multiple quadrotor unmanned aerial vehicles in the atmospheric boundary layer.

Atmospheric Measurement Techniques, 14(5), pp.3795–3814.

David Jacobs; ERG and WHO Secretariat staff. 2018; Rothfusz n.d.; ISO 7726:1998; Fisher NI. Statistical Analysis of Circular Data. 1993; ANSI/ASHRAE Standard 55-2020 2021)

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Temperature profile in heat sink used in thermoelectric modules

Rivera-Hernández, David Antonio*, Guzmán-Cortes, Jhonatan Alberto*, Rodríguez-Brito, Diana Isabel* y Alvarado-Juárez, Roberto*

**Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Veracruz, México, C.P. 94910*
(Tel: 278-732-2050; e-mail: davidantonioriverahernandez@gmail.com, jhonatanalbertoguzmancortes@gmail.com, diana.rodriguez@utcv.edu.mx, roberto.alvarado@utcv.edu.mx).

Abstract: The manuscript presents the comparison of several configurations of separation between fins of a heat sink used mainly in thermoelectric modules (TEM). The study considered as reference the central fin of each heat sink to measure the temperature and to do the comparative with the result obtained from Solid Works. Two heat sinks in the cold and hot side were considered. For the study, it was considered the variation of the distance between each fin (p= 5.08, 3.81, 2.54 and 1.27 mm) as well as the variation of the convective heat transfer (h=5, 20, 50, 100, 150 and 200 W/(m^2·K)).

The results show that there is not significatively difference in the comparison results for the cold side of the TEM, however, on the hot side of the TEM there are difference for the cases of p and h. The best option to decrease the temperature of the fins is the case p=1.27mm and h=200 W/(m^2·K).

Keywords: Thermoelectric module, Peltier cell, heat sink, heat transfer, fins.

1. INTRODUCCIÓN

Los módulos termoeléctricos (TEM) con celda Peltier son utilizados en sistemas de refrigeración por su capacidad de control térmico y operación silenciosa (Hájovský et al., 2016). Sin embargo, su eficiencia está limitada por su capacidad de disipación térmica en ambos lados. La forma de las aletas y tamaño determina la capacidad de disipación y por tanto el rendimiento del sistema, es por ello que es necesario hacer estudios térmicos para analizar la eficiencia de estos TEM (Nasri et al., 2017; Korprasertsak and Leephakpreeda, 2017).

Wei-Hsin et al. (2012) analizaron tres módulos de enfriamiento termoeléctrico mediante simulación numérica. El análisis realizado fue tridimensional. Los resultados obtenidos sugieren que la potencia de enfriamiento de módulo termoeléctrico con efecto Thomson se puede mejorar de un 5 a un 7 % y que con un mayor número de TEC se mejora el efecto Thomson de enfriamiento. Así también el COP aumenta cuando se reducen los TEC dentro del módulo. De igual manera concluyeron que la disipación de calor debido al efecto Peltier es linealmente proporcional al aumento de corriente eléctrica.

Joo y Kim (2015) compararon el rendimiento térmico de disipadores con aletas de placa y aletas de alfiler bajo condiciones de convección natural, utilizando disipadores con área base de 80×80 mm y alturas de aleta entre 30-50 mm. Sus resultados demostraron que, para un mismo volumen, los disipadores de aletas de placa superan a los de aletas de alfiler con una resistencia térmica 18-22% menor, debido a una mayor área superficial efectiva para la transferencia de calor en este régimen de flujo.

Salami & Binti (2018) realizaron el estudio numérico y experimental en disipadores de calor con perforaciones en comparación con un disipador convencional. Los autores observaron que la distribución de temperatura total en aletas perforadas es mayor que la de disipadores convencionales. La caída de presión a lo largar de las aletas del disipador es menor por lo que se reduce la potencia de bombeo y se incrementa el desempeño térmico. De igual forma se incrementa el número de Nusselt en disipadores con aletas perforadas y se observó un incremento de hasta el 4% en aletas perforadas en comparación con aletas sólidas.

Siahmargoi et al. (2019) realizaron un estudio para determinar el efecto del cambio de voltaje y de resistencia térmica de disipadores de calor en el lado caliente y el lado frío de un enfriador termoeléctrico. Las ecuaciones gobernantes de conservación de energía y de transferencia de calor fueron resueltas y calcularon el COP y la potencia suministrada. El disipador usado en el experimento tiene dimensiones de 107×107×20mm con 23 aletas y un módulo termoeléctrico de 40×40×3.5mm. De los resultados obtenidos concluyeron que al fijar la resistencia térmica existe un voltaje óptimo en el que

la potencia de enfriamiento alcanza su valor máximo. Así también que la resistencia térmica tiene un efecto inverso en el COP del TEC. Cuando se aumenta la resistencia térmica disminuye la temperatura del lado frío.

Huang et al (2000) diseñaron un método para determinar las curvas de desempeño de disipadores de calor. En el estudio experimental se usó un disipador de aluminio extruido de 6mm de espesor y una base de 180×150mm y 15 aletas de 1.5mm de espesor y altura de 55mm. Los autores observaron un incremento del 42% en el desempeño del disipador. Del diseño experimental los autores obtuvieron relaciones empíricas por medio de regresiones lineales. Los autores concluyeron que los disipadores de calor pueden ser diseñados sin tanta dificultad una vez que se determina la resistencia térmica del sistema.

Freegah et al. (2020) realizaron un estudio donde proponen un disipador con remoción de material en la base del mismo. Las aletas se colocan como pasadores y se analizaron diferentes disposiciones de estas aletas con flujo paralelo y flujo incidente. El disipador de referencia tiene dimensiones de 39.7×40×5mm y altura de aletas de 20mm. El diseño propuesto reduce la temperatura en la base del disipador hasta un 25.1% y hasta un 29% la resistencia térmica.

Ozbalci et al. (2022) realizaron un estudio experimental de la disipación de calor de un bloque de agua. El estudió consideró tanto el caso de agua pura como agua con una fracción de nano partículas para enfriamiento en un disipador de 25×25×10mm. En el estudio se observó que la temperatura promedio del disipador disminuye rápidamente con el incremento del flujo volumétrico. Después de los 650mL/min esa disminución era mas lenta. Observaron que el uso de nanofluidos disminuye la temperatura de la superficie del disipador hasta un 10.5%

Pupcevic et al. (2025) realizaron un estudio experimental de un intercambiador con una celda Peltier con base de 40×40mm y altura de aletas de 25mm. Los autores observaron que se obtenía una temperatura máxima de 90°C con una potencia de 9.026W y temperatura externa de 10°C. En el estudio se observó que la distancia optima entre las aletas debe ser de 5.26mm.

Con el propósito de hacer una correcta selección y mayor eficiencia al seleccionar los disipadores comerciales se realiza esta este estudio.

2. MODELO FÍSICO

El TEM analizado se muestra en la Figura 1. El TEM tiene un disipador de calor de aleación de aluminio en el lado frío con una base de 60 mm × 46 mm, un aislamiento térmico de 69 mm × 64 mm × 5 mm, una celda Peltier con una dimensión de 40 mm × 40 mm × 4 mm y un disipador de calor de aleación de aluminio. En el lado caliente tiene una base de 100 mm × 100 mm.

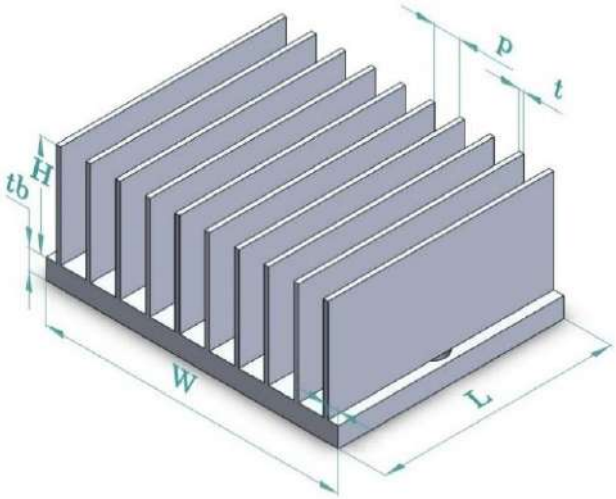


Figura 1 Representación de las dimensiones de los elementos del disipador de calor.

El módulo Peltier analizado opera con temperaturas de Th=85°C y Tc=12°C en los lados caliente y frío, respectivamente. Los disipadores de aleación de aluminio disipan energía por convección y radiación hacia el ambiente a T∞=25°C. Se consideró una emisividad de 0.85 con factor de vista de 0.5 debido a la configuración de aletas paralelas. Los coeficientes de transferencia de calor convectivo analizados fueron 5, 20, 50, 100, 150 y 200 W/(m²·K), con una resistencia térmica de contacto de 5×10^{-6} K·m²/W entre la celda Peltier y los disipadores.

Los parámetros geométricos usados para las variaciones de los disipadores se muestran en la Tabla 1, donde:

- L: Longitud de la base del disipador
- W: Ancho de la base del disipador
- tb: Espesor de la base del disipador
- H: Altura de las aletas
- t: Espesor de las aletas
- p: Espaciamiento entre aletas

Tabla 1. Parámetros geométricos en cm

Lado	L	W	tb	N	H	T	p
C1	4.6	6	0.406	10	2.083	0.094	0.508
C2				13			0.381
C3				17			0.254
C4				27			0.127
H1	10	10	0.229	17	2.057	0.094	0.508
H2				21			0.381
H3				28			0.254
H4				44			0.127

2.1 Modelo de estudio

En la Figura 2 observamos el modelo TEM con vista explosionada, donde encontramos las partes que lo componen y sus funcionamientos:

1. Disipador lado frío: Su función es llevar el calor del ambiente hacia el módulo Peltier.

2. Aislante térmico: Evita la transferencia de calor directa entre los lados caliente y frío, asegurando que el flujo térmico se mantenga a través del módulo Peltier.

3. Celda Peltier: Su función es llevar el calor del lado frío al lado caliente cuando se aplica una corriente eléctrica, generando así el diferencial de temperatura.

4. Disipador lado caliente: Su función es llevar el calor entregado por la celda Peltier hacia el ambiente exterior.

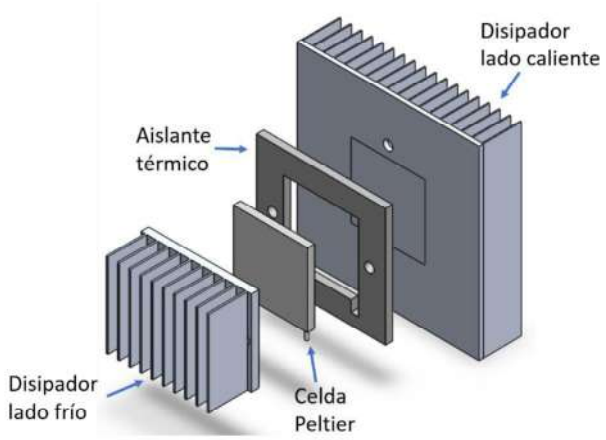


Figura 2 TEM con vista explosionada

Para el análisis se utilizó el software SolidWorks con una malla estándar fina de tolerancia 0.125 mm y 16 puntos Jacobianos. El caso C1-H1 empleó 76,001 elementos con 146,676 nodos, mientras que el caso C4-H4 utilizó 170,438 elementos con 334,290 nodos, todos de alto orden. La Figura 1 muestra la geometría completa de los disipadores del sistema y la Figura 3 muestra el mallado del caso más extremo analizado.

3. MODELO MATEMÁTICO

La ecuación que rige la conducción de calor en régimen estacionario sin generación volumétrica se obtiene mediante la ecuación (1) (Çengel y Ghajar, 2011):

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \qquad (1)$$

La transferencia de calor por convección y radiación en la frontera se obtiene mediante las ecuaciones (2) y (3), respectivamente:

$$\dot{Q}_{\text{convección}} = \text{hA}(T_s - T_\infty) \qquad (2)$$

$$\dot{Q}_{\text{radiación}} = \varepsilon \text{A} \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \qquad (3)$$

Donde k es la conductividad térmica, h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, Q es el flujo de calor por unidad de tiempo, T es la temperatura, ε es la emisividad, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, el subíndice s indica valor en la superficie y el subíndice ∞ indica valor del exterior.

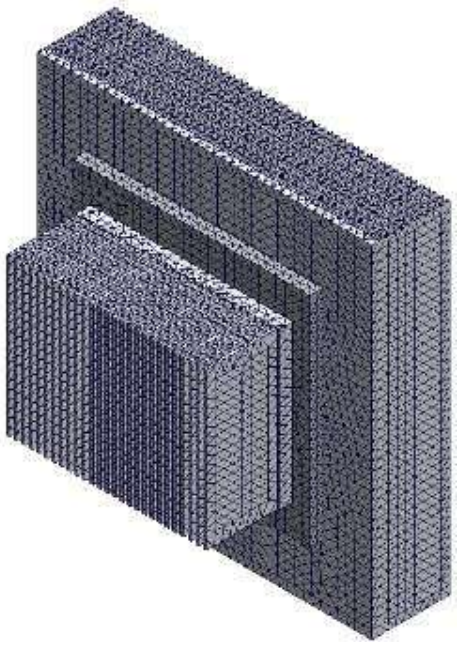


Figura 3 Malla utilizada en el caso de C4 H4 para el análisis térmico.

4. MÉTODO DE SOLUCIÓN

Para el análisis se utilizó el software SolidWorks. La ecuación que rige se resuelve mediante el método de elementos finitos, donde la ecuación discretizada se aproxima en cada elemento de la malla. Se utilizó una cuadrícula estándar fina con una tolerancia de 0,125 mm y 16 puntos jacobianos. En el caso de C1 y H1 se utilizaron 76.001 elementos con 146.676 nodos, y en el caso de C4 y H4 se utilizaron 170.438 elementos con 334.290 nodos. Los elementos eran de orden alto. La Figura 3 muestra la cuadrícula para los casos C4 y H4.

Las soluciones obtenidas fueron en estado permanente. En el sólido se consideró conducción de calor y en las fronteras de los elementos intercambio de calor por convección y radiación con los alrededores.

5. RESULTADOS

Los resultados obtenidos fue el perfil de temperatura. Se analizó el valor desde la base al extremo final de la aleta central y al centro del disipador, donde es el punto donde está la temperatura más alta o más baja en la celda Peltier y que se transfiere a los disipadores.

La Figura 4 muestra la temperatura en una aleta central del disipador de calor en la cara fría para h = 5 W/(m² K) y los cuatro casos de p. Se observa un gradiente de temperatura similar al presentar la transferencia de calor por convección

natural. La diferencia máxima de temperatura presentada fue $\Delta T = 0.3$ °C en cada caso.

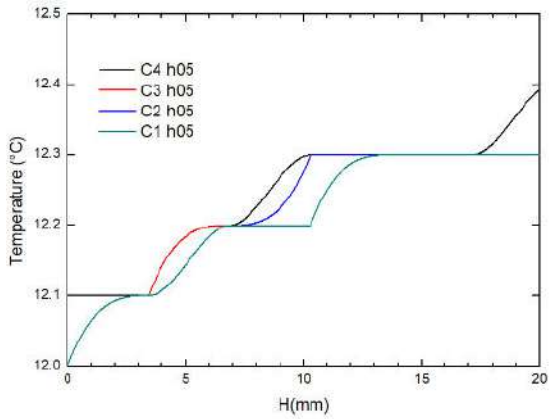


Figura 4 Perfil de temperatura para el caso de h=5 W/(m² K) y los cuatro casos de p en el lado frío del TEM.

A medida que la transferencia de calor convectiva aumenta a 200 W/(m²·K), la temperatura en el disipador de calor del lado frío aumenta de 12.5 °C a 17.8 °C. La diferencia máxima de temperatura entre los casos C4 y C1 fue de 0.5 °C, como se muestra en la Figura 5.

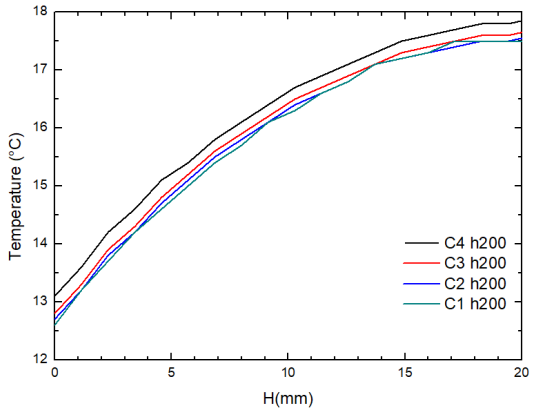


Figura 5 Perfil de temperatura para el caso de h=200 W/(m² K) y los cuatro casos de p en el lado frío del TEM.

Para el lado caliente de un TEM, la Figura 6 muestra el comportamiento térmico en la aleta central para h = 5 W/(m² K). Como se observa, a medida que se aleja de la base del disipador de calor, la temperatura disminuye hasta 81.2 °C, lo que representa una disminución de 3.8 °C en el caso de la convección natural. A medida que aumenta el número de aletas, la temperatura disminuye hasta 0.6 °C en el caso de H4 con respecto a H1. A pesar de la reducción de temperatura, esta disminución no es significativa.

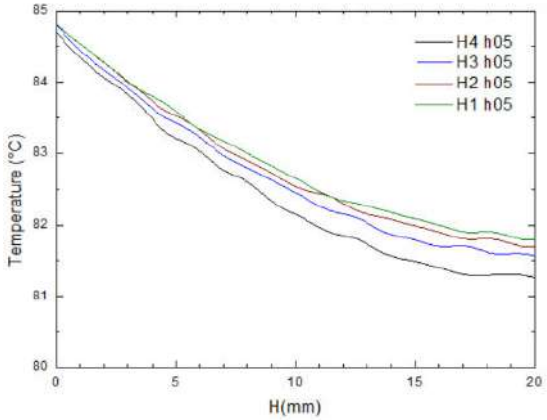


Figura 6 Perfil de temperatura para el caso de h=5 W/(m² K) y los cuatro casos de p en el lado caliente del TEM.

La Figura 7 muestra el comportamiento térmico en la aleta central para h = 200 W/(m² K). Al igual que en la Figura 5, se observa una disminución de temperatura de 81.4 °C a 51.5 °C para el caso de H4 ($\Delta T = 29.9$ °C). La diferencia máxima de temperatura entre C1 y C4 es de 1.6 °C.

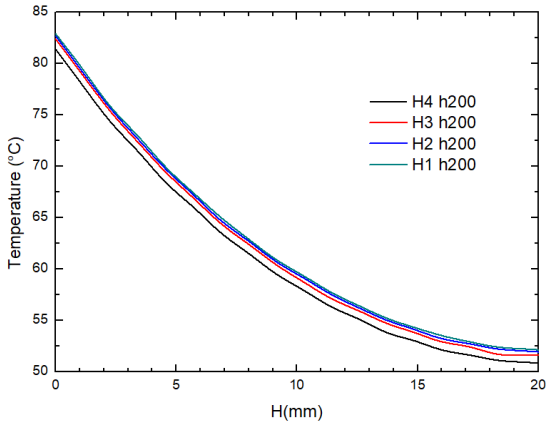


Figura 7 Perfil de temperatura para el caso de h=200 W/(m² K) y los cuatro casos de p en el lado caliente del TEM.

La Figura 8 muestra el comportamiento térmico del disipador de calor ubicado en el lado frío. Los valores se obtuvieron en la aleta central para los casos C1 y C4, con transferencia de calor convectiva de 5 W/(m² K) a h=200 W/(m² K). Se observa que para h=5 W/(m² K) no hay cambios significativos, como se presentó en la Figura 3. A medida que h aumenta, la temperatura aumenta en el extremo de la aleta. Los casos con mayor número de aletas pierden más energía que los casos con menos aletas; sin embargo, la diferencia máxima de temperatura fue de 0.5 °C para h=200 W/(m² K) para C4 con respecto a C1. Por lo tanto, N no tiene un efecto significativo en el lado frío.

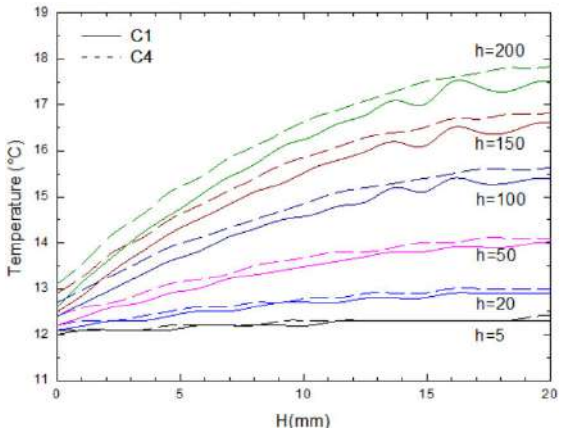


Figura 8 Perfil de temperatura en el lado frío para los casos C1 y C4 con la variación de la transferencia de calor convectiva.

Por otro lado, la Figura 9 muestra el comportamiento térmico del disipador ubicado en el lado caliente para los casos H1 y H4 a diferentes valores de h. A medida que h aumenta, la temperatura en el extremo de la aleta disminuye. Los casos con mayor número de aletas obtienen más energía de la temperatura ambiente que los casos con menos aletas; la diferencia máxima de temperatura fue de 1.5 °C para h = 200 W/(m² K) para H4 con respecto a H1. Con el aumento de h, la temperatura en el extremo de las aletas puede disminuir 3 °C para h = 5 W/(m² K), en comparación con la temperatura y la base del disipador, y para h = 200 W/(m² K) esta temperatura se reduce hasta 30.9 °C.

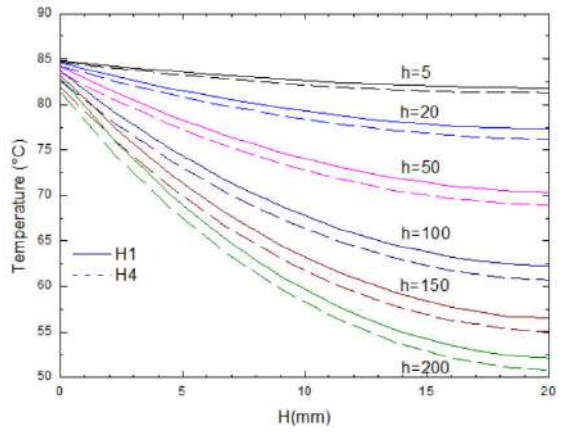


Figura 9 Perfil de temperatura en el lado caliente para los casos C1 y C4 con la variación de la transferencia de calor convectiva.

6. CONCLUSIONES

El análisis de la Transferencia de Calor (TC) en los Módulos Termoeléctricos (TEM) usados para nuestra investigación reveló que la interacción entre el Espaciamiento entre Aletas (p) y el Coeficiente Convectivo de Transferencia de Calor (h) es crucial.

En la mayoría de las simulaciones con valores bajos en h como 5 y 20 W/(m² K), la reducción del parámetro del espaciamiento entre aletas no mejoró el rendimiento de la manera más optima. Sin embargo, donde los para valores para el coeficiente convectivo de transferencia de calor son altos (150 y 200 W/(m² K)), la reducción del espaciamiento entre aletas mostró un beneficio. La configuración con p=1.27 mm y h=200 W/(m² K) demostró ser la más efectiva para reducir la temperatura en el lado caliente del TEM, identificándose, así como la configuración óptima mientras que para el lado frío no hay diferencias significativas, por lo que aquí se debe analizar el costo beneficio de tener un disipador con más o menos número de aletas.

El análisis térmico para el disipador de calor utilizado en un TEM comercial reveló que, en el lado frío, al considerar un valor bajo de **h** no se obtiene una gran ventaja sobre las demás variantes de **p**, ya que apenas se logró una diferencia de 0.3 °C.

Por otra parte, al proponer un valor mayor h=200 W/(m² K), la configuración C4 puede aumentar la temperatura del disipador de calor debido a su mayor área de transferencia de calor.

En el lado caliente, la temperatura disminuye al aumentar el número de aletas en 0,6 °C para h=5 W/(m² K). La temperatura desciende de 84.8 °C en la base del disipador a 81,2 °C en el extremo de la aleta.

Los resultados demostraron que la geometría del disipador y la intensificación de la convección intensifican la disipación del calor en el lado de mayor temperatura mientras que en lado de menor temperatura no tienen efecto significativo.

Este trabajo contribuye al entendimiento de la transferencia de calor en módulos termoeléctricos y brinda una guía para la eficiencia de estos sistemas con fines de enfriamiento.

ABREVIATURAS

- A Superficie (m^2)
- H Altura de las aletas (cm)
- h Coeficiente de transferencia de calor convectivo [W/(m² K)]
- k Conductividad térmica [W/(m K)]
- L Longitud de la base del disipador (cm)
- N Número de aletas
- p Espaciamiento entre aletas (cm)
- Q Transferencia de calor (W)
- T Temperatura (°C)
- t Espesor de las aletas (cm)
- Tb Espesor de la base
- TEM Módulo Termoeléctrico
- W Ancho de la base del disipador (cm)
- ε Emisividad
- σ Constante de Stefan-Boltzmann (5.6707×10-8 W/(m^2 K^4))

Subíndices

- c Lado frío (cold)
- h Lado caliente (hot)
- s Superficie

- ∞ Valor ambiente

REFERENCIAS

Çengel, Y.A. & Ghajar, A.J. (2011), Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications (4a ed.). McGraw-Hill Higher Education.

Freegah, B., Hussain, A.A., Falih, A.H. &Towyfyan, H. (2020), CFD analysis of heat transfer enhancement in plate-fin het sinks with fillet profile: investigation of new designs. Thermal Science and Engineering Progress 17, 1000458. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100458

Hájovský, R., Pieš, M., & Richtár, L. (2016). Analysis of the appropriateness of the use of Peltier cells as energy sources. *Sensors*, 16(6), 760. https://doi.org/10.3390/s16060760

Huang, B.J., Chin, C.J. & Duang, C.L. (2000), A design method of thermoelectric cooler. *International Journal of Refrigeration* 23, 208-218. https://doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00046-8

Joo, Y., & Kim, S. J. (2015). Comparison of thermal performance between plate-fin and pin-fin heat sinks in natural convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 83, 345-356. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.12.023

Korprasertsak, N., & Leephakpreeda, T. (2016). Mathematical modeling and validation of cooling/heating effects in thermoelectric module coupled with heat sinks. *2016 7th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering*, 95-99. https://doi.org/10.1109/icmae.2016.7549515

Nasri, W., Djebali, R., Dhaoui, S., Abboudi, S., & Kharroubi, H. (2017). Finite elements multiphysics investigation of thermoelectric systems for electricity and cooling generation. *International Journal of Modern Studies in Mechanical Engineering* 3(4), 1-13. http://dx.doi.org/10.20431/2454-9711.0304001

Ozbalci, O., Dogan, A., & Asilturk, M. (2022). Heat Transfer Performance of Plate Fin and Pin Fin Heat Sinks Using Al_2O_3/H_2O Nanofluid in Electronic Cooling. *Processes*, *10*(8), 1644. https://doi.org/10.3390/pr10081644

Pupcevic, M.B., Gvero, P., Zeljkovic, C., Kotur, M., Mrsic, P., & Tesic, S. (2025). Optimization and experimental validation of a natural convection space heater using the Peltier elements. Thermal Science. 29(3), 2141-2153; https://doi.org/10.2298/TSCI230404256P

Salami Tijani, A. & Binti Jaffri, N. (2018), Thermal analysis of perforated pin-fins heat sink under forced convection condition. *Procedia manufacturing* 24, 290-298. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.025

Siahmargoi, M., Rahbar, N., Kargarsharifabad, H., Kargarsharifabad, H., Esmaeil Sadati, S. & Asadi., Amin (2019). An Experimental Study on the Performance Evaluation and Thermodynamic Modeling of a Thermoelectric Cooler Combined with Two Heatsinks. *Scientific Reports* **9**, 20336 (2019). https://doi.org/10.1038/s41598-019-56672-9

Wei-Hsin, C., Chen-Yeh, L. & Chen-I, H (2012), A numerical study on the performance of miniature thermoelectric cooler affected by Thomson effect. *Applied Energy* 89, 464-473. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.022

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Mechanical Design of Aquatic Robot Applied to Collect Solid Waste in Lake Areas of CDMX

Elizabeth Salmerón Martínez *, Erick Gael Avila Cruz *

** Instituto Tecnológico de Tláhuac, Av Estanislao Ramírez Ruiz 301, Amp. Selene, Tláhuac, 13420 Ciudad de México (Tel: 55 7312 5616, e-mail: elizabeth.sm@tlahuac.tecnm.mx, 211065131@tecnologicotlahuac.edu.mx).*

Abstract: The presence of floating solid contaminants in lake areas (chinampas) and World Heritage sites impact in a significant environmental challenge. The accumulation of waste limits the water area, including biodiversity environmental, aquatic ecosystem health, and agricultural activities. In order to solve this problems, we implement technological solution to efficient and sustainable management of floating solid waste, ensuring water quality and availability for future generations. The mechanical design combines kayak float structures and snow sled resistance, resulting in an integral waste collection system with a mechatronic approach. Robot dimensions are 0.92 m wide, 1.04 m long, and 0.22 m high, with a maximum load capacity of 35 kg, ensuring resistance and functionality under heavy conditions. Computer simulations evaluated the system's behavior in real environments, allowing for precise adjustments before construction. Additive manufacturing enabled the creation of customized and resistant parts, reducing the environmental impact associated with traditional manufacturing processes. This innovative approach ensures the system's durability and effectiveness in managing floating solid waste, performing water quality and availability for future generations.

Keywords: Aquatic, Additive manufacturing, Design, Robot, Chinampa, Waste, Mechanical, Xochimilco.

1. INTRODUCCIÓN

México cuenta con zonas lacustres declaradas patrimonio cultural de la humanidad, un ejemplo distintivo es la zona chinampera, ubicada al sur y oriente de la CDMX. Las cuales albergan una gran variedad de especies nativas, muchas de ellas endémicas, las cuales enfrentan una creciente amenaza ambiental debido al crecimiento de la mancha urbana, originando una acumulación de desechos sólidos flotantes en sus reservas de agua natural, esta problemática compromete la biodiversidad y la salud de los ecosistemas acuáticos, además representa un peligro agrícola ((SEMARNAT); (INECC), 2020); (Baggio, 2022). De acuerdo con el diagnostico básico para la gestión integral de los residuos, México genera más de 120 mil toneladas de residuos al día, de los cuales solo 38 mil toneladas son aprovechadas como reciclaje o recuperación energética (SEMARNAT, 2024)

Esto representa un desafío importante para la gestión de residuos en el país, ya que la producción de residuos excede la capacidad de recolección y tratamiento ((SEMARNAT); (INECC), 2020)La acumulación de desechos sólidos flotantes en las zonas lacustres también tiene un impacto negativo en la salud humana y el medio ambiente. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la exposición a los desechos sólidos puede causar enfermedades respiratorias, gastrointestinales y cutáneas, entre otras (World Health Organization, 2024). Además, la contaminación del agua por desechos sólidos puede afectar la biodiversidad y la salud de los ecosistemas acuáticos (CONABIO, 2020).

Ante esta problemática, es de vital importancia implementar soluciones tecnológicas que permitan recolectar los residuos sólidos flotantes de una manera eficiente y rápida, ya que actualmente son retirados mediante brigadas de trabajadores que, desde sus embarcaciones extraen manualmente los residuos sólidos, lo que pone en riesgo su integridad fisca, además de ser un método poco eficiente, ya que la producción de solidos excede la capacidad de recolección manual. El uso de robots recolectores de desechos sólidos es una opción viable para abordar este desafío, ya que pueden operar de manera autónoma y eficiente en entornos acuáticos.

Con base a lo antes mencionado, se analizó el diseño de un robot recolector de desechos sólidos para reemplazar el método tradicional de recolección de basura en los canales. El diseño mecánico está inspirado en modelos tradicionales de navíos y botes utilizados para el traslado de recursos. Ambos modelos se combinaron en la estructura de los flotadores de kayaks y la resistencia de los trineos para nieve, dando como resultado un sistema integral de recolección de residuos, con dimensiones nominales de 0,92 m de ancho, 1,04 m de longitud y una altura de 0,22m, con un enfoque mecatrónico.

Por medio de cálculos matemáticos basados en diversos principios como, hidrostático y análisis estructural se determina que el modelo tiene una factibilidad de flotación y una capacidad de carga de hasta 35 kilogramos, esto incluye el peso de los componentes, así como la carga destinada de almacenamiento de desechos. Las simulaciones computacionales permitieron evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones de entorno real, donde se incorporó

un análisis de variables físicas y ambientales como son, la altura de flotación y la densidad del agua, facilitando ajustes precisos antes de la construcción del robot.
Por último, para la fabricación de los componentes que conforman el modelo mecánico, se empleó manufactura aditiva, lo que permitió la creación de piezas personalizadas, resistentes y adaptadas a las exigencias al medio ambiente. Este enfoque no solo mejora la durabilidad del sistema, sino que también reduce el impacto ambiental asociado a los procesos de manufactura tradicionales.

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada se basa en el diseño mecatrónico, desde una perspectiva de ingeniería.

1. Especificación del sistema: Análisis de las condiciones ambientales, incluyendo factores como la temperatura, la humedad y la exposición a la intemperie.

Fig. 1. Metodología de diseño mecatrónico

2. Diseño mecánico: A partir del análisis previo del ambiente, se realizan propuestas de diseño para el CAD, utilizando herramientas de modelado 3D y considerando factores como la resistencia estructural, la estabilidad.

3. Simulación virtual del sistema CAD: Se realiza una simulación virtual del modelo para evaluar su comportamiento y realizar ajustes antes de proceder con la construcción del modelo físico.

4. Construcción del equipo: Selección de materiales y técnicas de fabricación, utilizando materiales reciclables, biodegradables, resistentes al agua, impermeables y resistentes a temperaturas extremas; Considerando y usando técnicas de FDM (Modelado por Deposición Fundida), con el fin de modernizar la creación de proyectos con técnicas del siglo XXI.

5. Plan de mantenimiento: Se desarrolla un plan de mantenimiento que considera los diferentes parámetros del diseño del skimmer y establece procedimientos para su mantenimiento y reparación.

2.1 Especificación del sistema

La tabla 1 presenta un análisis de las condiciones ambientales de Xochimilco y Tláhuac, dos zonas lacustres en la Ciudad de México. El objetivo de este análisis es identificar los factores ambientales que pueden afectar el desempeño del sistema de recolección de desechos. Como se puede observar el uso del suelo en ambas zonas es mixto, con áreas agrícolas y urbanas. En general, ambas zonas tienen condiciones ambientales similares.

Tabla 1: Condiciones ambientales de la zona oriente y sur de México.

Factor	Tláhuac	Xochimilco
Temperatura	18-22°C (promedio anual)	18-22°C (promedio anual)
Humedad	50-70% (promedio anual)	60-80% (promedio anual)
Exposición a la intemperie	Moderada (zona lacustre)	Alta (zona lacustre)
Velocidad del viento	5-15 km/h (promedio anual)	5-15 km/h (promedio anual)
Altura de las olas	0,5-1,5 metros (promedio anual)	0,5-1,5 metros (promedio anual)
Precipitación	800-1.200 mm (promedio anual)	1.000-1.500 mm (promedio anual)
Nivel del agua	0-1 metro (promedio anual)	0-1 metro (promedio anual)
Corrientes de agua	Débiles (Zona chinampera)	Débiles (canal de Xochimilco)
Calidad del agua	Moderada (zona lacustre)	Moderada (zona lacustre)

2.2 Diseño mecánico

De acuerdo con las condiciones ambientales previstas, como la velocidad del viento, la altura de las olas y la temperatura, el sistema será diseñado bajo principios náuticos específicos, como la estabilidad y la resistencia a la corrosión, para resistir las fuerzas dinámicas y estáticas en las zonas lacustres de México. A partir de esta referencia, se establecen los parámetros de diseño y se realizan cálculos estructurales para garantizar la estabilidad y seguridad del sistema.

Tabla 2. Parámetros de diseño

Parámetros de diseño		
Categoría	**Subcategoría**	**Parámetros de diseño**
Ecosistema	Acuático	Características físicas y biológicas del entorno
Variables ambientales	-Humedad -Temperatura	-Densidad -Impermeabilidad
Biodiversidad	Plantas y animales	Diseño del prototipo no invasivo

La tabla 2. Presenta los parámetros que deben considerarse en el diseño dentro de ecosistema acuático de la zona lacustre de Xochimilco.

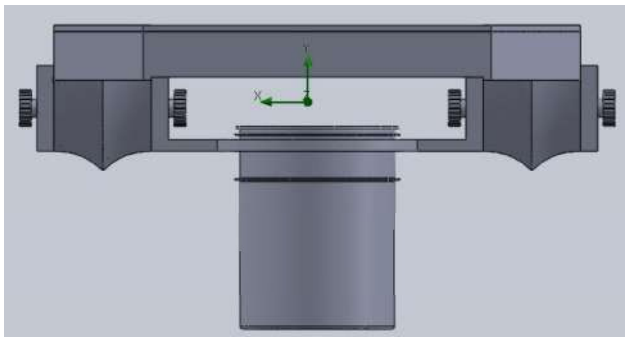


Fig. 2. Vista frontal del modelo

La Figura 2 muestra la configuración geométrica de la estructura, que se define como un elemento monolítico con un conjunto limitado a la unión de sus componentes de cierre. Sus dimensiones nominales son 0,92 m de ancho, 1,04 m de longitud y 0,22 m de altura. En el cálculo, se identifican entrantes con una inclinación de 45 grados, cuya función es optimizar la respuesta estructural ante cargas dinámicas inducidas por el ambiente operativo. Además, se observa una discontinuidad central con una separación de 0,58 m entre sus límites. Se propone una técnica que aprovecha la fuerza dinámica del movimiento del agua para lograr el objetivo.

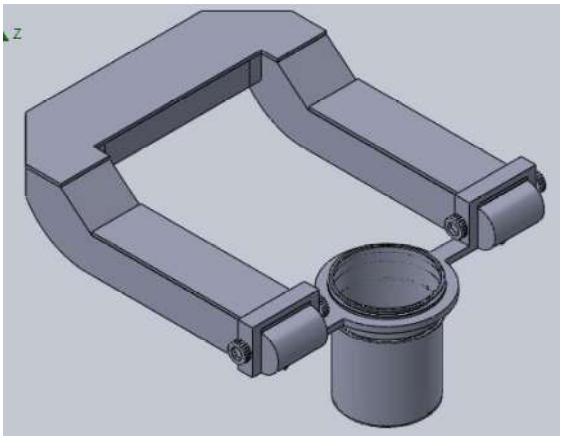


Fig. 3. Módulo de recolección

En la parte inferior de la Figura 3 se observa un elemento circular con un diámetro externo de 0,35 m y un diámetro interno de 0,29 m. Este diseño incorpora soportes específicos concebidos para la sujeción de los flotadores mediante sistemas de fijación por presión, lo que garantiza la estabilidad y el apoyo estructural del modelo. Esto permite que, cuando el modelo detecte un residuo flotante en su trayectoria de navegación, pueda bajar y subir para recoger desechos sólidos flotantes.

El modelo se inspiró en modelos tradicionales de navíos y botes utilizados para el traslado de recursos. La combinación de estos modelos con la estructura de los flotadores de kayaks y la resistencia de los trineos para nieve, sumada a la aerodinámica y la resistencia, dio como resultado un sistema integral de recolección de residuos con un enfoque mecatrónico.

2.3 Modelado matemático

Para obtener resultados precisos, se incorporan variables físicas y ambientales al análisis, como la altura de flotación y la densidad del agua. Una vez considerados los modelos y las dimensiones, se pueden obtener los siguientes resultados:

Tabla 3. Tabla de datos para cálculos hidrostáticos

Datos del modelo				
Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad	Observaciones
Longitud del flotador	L	0,9416	m	Largo del flotador
Ancho del flotador	B	0,17	m	Ancho efectivo del flotador
Separación entre centros	S	0,75	m	Distancia entre flotadores
Distancia eje central a flotador	d	0,375	m	$^{s}/_{2}$
Altura máxima del flotador	T_máx	0,15096	m	Límite máximo del flotador
Altura V del fondo	T_V	0,03	m	Profundidad de la terminal en V
Masa del sistema mecánico	m_modelo	10	kg	Masa total del material PETG
Masa del sistema electrónico	m_elec	3	kg	Incluye sistema de energía
Masa de carga basura/agua	m_c	variable	kg	Capacidad de resistencia del skimmer
Densidad del agua	p	1000	kg/m^3	Agua dulce
Gravedad	g	9,800665	m/s^2	Aceleración de la gravedad
Centro de gravedad	KG	0,51488	m	Sobre la quilla

Con base en los parámetros obtenidos del modelo y en datos empíricos universalmente aceptados, se puede determinar la capacidad de resistencia del skimmer y las condiciones de carga hipotéticas a las que se someterá.

2.3.1 Área y volumen por flotador

Considerando que el modelo es una unidad de flotación, los cálculos se establecieron minuciosamente para cada uno de los flotadores considerados en la ecuación 1, obteniendo los siguientes resultados:

Área del waterplane (flotador) teniendo en cuenta la siguiente formula:

$$A_{fl} = L * B \qquad (1)$$

Donde:

$A_{fl} = Área\ del\ flotador$
$L = Longitud\ del\ flotador$
$B = Ancho\ del\ flotador$

Sustituyendo los datos de la tabla en la ecuación 1 se obtiene como resultado:

$$A_{fl} = L * B = 0{,}9416m * 0{,}17m = 0{,}160072m^2$$

Cálculo el volumen máximo por flotador ocupando la siguiente formula de la ecuación 2:

$$V_{max,por} = A_{fl} * T_{max} \qquad (2)$$

Donde:

$V_{max,por} =$ Volumen máximo por flotador
$A_{fl} = Área\ del\ flotador$
$T_{max} = \ Altura\ máxima\ del\ flotador$

Sustituyendo los valores en la ecuación 2 se obtiene:

$$V_{max,por} = A_{fl} * T_{max} = 0{,}160072m^2 \cdot 0{,}15096m = 0{,}02415\ m^3$$

Considerando los dos flotadores, se multiplica por 2 el volumen máximo por flotador obtenido, lo que da como resultado el volumen máximo total de los dos flotadores, se obtiene el siguiente resultado.

$$V_{max,total} = 2 \cdot 0{,}02415m^3 = 0{,}0483\ m^3$$

2.3.2 Volumen necesario para flotación

Esta parametrización se deriva de la fórmula tradicional que relaciona la densidad con la proporcionalidad entre el volumen y la masa del fluido. Esta relación es fundamental para el análisis de flotación y se establece mediante la fórmula de la ecuación 3. Para calcular la densidad, se emplea la fórmula despejando los valores necesarios, lo que da como resultado la expresión de la ecuación 4. Esta expresión permite determinar el volumen requerido para el diseño del sistema.

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (3)$$

$$V = \frac{m}{\rho} \qquad (4)$$

En donde:
$\rho = Densidad$
$m = Masa$
$V = volumen$

Después de despejar la ecuación 4 y sustituir los valores con los datos de la tabla de datos del modelo anterior, se obtiene:

$$V_{req} = \frac{m_{total}}{\rho} = \frac{20kg}{1000\frac{kg}{m^3}} = 0{,}020m^3$$

Donde:

$V_{req} = Voumen\ requerido$
$m_{total} = Masa\ total$
$\rho = Densidad(de\ agua\ dulce\ )$

Una vez determinado el volumen requerido, se considera que el sistema cuenta con dos flotadores. Por lo tanto, se divide el volumen total entre dos para determinar el volumen necesario para cada flotador individual. Esto garantiza la flotación del sistema bajo una carga de 20 kilogramos, según los datos presentados en la tabla anterior. Como resultado de este cálculo, se obtiene el volumen específico que debe tener cada flotador para cumplir con los requisitos de sustentación.

$$V_1 = \frac{0{,}020m^3}{2} = 0{,}010m^3$$

2.3.3 Calado considerando fondo en V

Considerando que el casco tiene una terminación triangular, se pueden realizar los siguientes cálculos para el calado del sistema utilizando la ecuación 5.

$$V_V = \frac{1}{2} * B * T_V * L \qquad (5)$$

En donde:
$V_V = Volumen\ V\ triangular$
$B = Ancho\ del\ flotador$
$T_V = Altura\ V\ del\ fondo$
$L = Longitud\ del\ flotador$

Como hay dos flotadores, se divide por la mitad el resultado de la operación para obtener el calado individual de cada flotador.
Sustituyendo los valores en la ecuación 5, se obtiene que:

$$V_V = \frac{1}{2} * B * T_V * L = \frac{1}{2} * 0{,}17m * 0{,}03m * 0{,}9416m = 0{,}002401\ m^3$$

Calculado el volumen rectangular restante se tiene que desarrollar una resta del volumen requerido ya calculado de un flotador y restarlo con el volumen V triangular lo cual obtenemos lo siguiente:

$$V_1 - V_V = 0{,}010m^3 - 0{,}002401m^3 = 0{,}00759892\ m^3$$

Con el resultado de la ecuación, se puede calcular la altura rectangular sobre V. Para ello, se utiliza la ecuación 6 para desarrollar el cálculo de la altura con respecto al término del casco.

$$h = \frac{V_1 - V_V}{A_{fl}} \qquad (6)$$

Donde:

$h = Altura\ rectangular\ sobre\ V$
$V_1 = Volumen\ requerido\ de\ un\ solo\ flotador$
$A_{fl} = Área\ del\ flotador$

Sustituyendo los valores en la ecuación, se obtiene como resultado:

$$h = \frac{V_1 - V_V}{A_{fl}} = \frac{0{,}00759892m^3}{0{,}160072m^2} = 0{,}04747\ m = 47{,}47\ mm$$

Una vez obtenido el cálculo de la altura, junto con la diferencia de volúmenes y la división del área del flotador, se puede calcular el calado y el francobordo, que es la distancia vertical

entre la línea de flotación y la cubierta principal, utilizando la siguiente fórmula.

$$T_{req} = T_V + h \qquad (7)$$

El cual:
$T_{req} = Altura\ requerida$
$T_V = Altura\ V\ del\ fondo$
$h = Altura\ rectangular\ sobre\ V$

Sustituyendo los valores en la fórmula anterior, se obtiene:

$$T_{req} = T_V + h = 0{,}03m + 0{,}04747m = 0{,}07747\ m = 77{,}47\ mm$$

Una vez obtenida la altura requerida y la altura máxima, se utiliza la siguiente fórmula para calcular la distancia entre la línea de flotación y la cubierta principal del modelo. Sustituyendo los valores, se obtiene:

$$Freeboard = T_{max} - T_{req} = 0{,}15096m - 0{,}07747m = 0{,}07349\ m = 73{,}49\ mm$$

2.3.4 Estabilidad Transversal (nuevo d)

Utilizando los factores de la longitud y ancho del modelo, se puede aplicar la fórmula directa del segundo momento de área (momento de inercia geométrica por rectángulo respecto al eje central) para obtener el nuevo valor de la distancia entre el eje central y el flotador. A continuación, se presenta la fórmula utilizada.

$$I_{local} = \frac{L*B^3}{12} \qquad (8)$$

En donde:
$L = Longitud\ del\ flotador$
$B = Ancho\ del\ flotador$
$I_{local} = Momento\ de\ inercia\ local$

Sustituyendo los valores en la ecuación 8, se obtiene el resultado del momento de inercia local.

$$I_{local} = \frac{L * B^3}{12} = \frac{0{,}9416m * (0{,}17m)^3}{12} = 0{,}00038551\ m^4$$

Se reserva el resultado para su uso posterior. A continuación, se calcula el momento de inercia total de waterplane utilizando la siguiente fórmula:

$$I_{wp} = 2(I_{local} + A_{fl} * d^2) \qquad (9)$$

Donde:
$I_{wp} = Momento\ de\ inercia\ total\ del\ waterplane$
$I_{local} = Momento\ de\ inercia\ local$
$d = Distancia\ eje\ central\ a\ flotador$

Sustituyendo d = 0,375 m, se obtiene:

$$I_{wp} = 2\left(I_{local} + A_{fl} * d^2\right) = 2(0{,}00038551m^4 + 0{,}160072m^2 * (0{,}375m)^2) = 2(0{,}00038551m^4 + 0{,}02251m^4) = 2 * 0{,}0228955m^4 = 0{,}045791\ m^4$$

Una vez obtenidas ambas inercias, se calcula el radio métrico del modelo utilizando la siguiente fórmula:

$$BM = \frac{I_{wp}}{V_{req}} \qquad (10)$$

Esto se puede interpretar como:

$BM = Radio\ Meacéntrico$
$I_{wp} = Momento\ de\ inercia\ total\ del\ waterplane$
$V_{req} = Voumen\ requerido$

Sustituyendo los valores obtenidos, queda de la siguiente manera:

$$BM = \frac{I_{wp}}{V_{req}} = \frac{0{,}045791\ m^4}{0{,}020m^3} = 2{,}28955\ m$$

Se calcula el radio para obtener la altura metacéntrica del modelo, lo que asegura la estabilidad del modelo. A continuación, se utiliza la siguiente fórmula para obtener el valor del centro de carena:

$$KB \approx \frac{T_{req}}{2} \qquad (11)$$

Esto se puede expresar como:

$KB = Centro\ de\ carena$
$T_{req} = Altura\ requerida$

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$KB \approx \frac{T_{req}}{2} = \frac{0{,}07747m}{2} = 0{,}038735m$$

Finalmente, se realizan las operaciones con los resultados obtenidos anteriormente para obtener los valores de estabilidad mediante la siguiente fórmula:

$$GM = KB + BM - KG \qquad (12)$$

En donde:
$GM = Altura\ metacéntrica$
$KB = Centro\ de\ carena$
$KG = Centro\ de\ gravedad$
$BM = Radio\ Metacéntrico$

Sustituyendo los valores, se obtiene el resultado siguiente:

$$GM = KB + BM - KG = 0{,}038735m + 2{,}28955m - 0{,}51488m = 1{,}8134\ m$$

El resultado positivo de la altura metacéntrica indica una buena estabilidad, ya que un valor positivo mayor implica una mayor estabilidad en la flotabilidad.

2.3.5 Fuerza de flotación y presión

Una vez realizados todos los cálculos y considerando el modelo y sus dimensiones, se pueden determinar los datos de la fuerza de flotación y la presión ejercida por el material que recolectará en las zonas lacustres. Para obtener el valor de flotabilidad del skimer, se emplea la siguiente fórmula:

$$F_b = m_{total} * g \qquad (13)$$

Esto se puede expresar como:
$F_b = Fuerza\ de\ flotación$
$m_{total} = Masa\ total$
$g = Gravedad$

Sustituyendo los valores se obtiene:
$$F_b = m_{total} * g = 20kg \cdot 9{,}80665m/s^2 = 196{,}133\ N$$

No obstante, para obtener la presión se procede a realizar los cálculos correspondientes, utilizando la siguiente fórmula:

$$\rho_{quilla} = \rho g T_{req} \qquad (14)$$

En donde:
$g = Gravedad$
$\rho = Densidad$
$T_{req} = Altura\ requerida$
Sustituyendo los valores, se obtiene:

$$\rho_{quilla} = \rho g T_{req} = 1000\frac{kg}{m^3} * 9{,}80665\frac{m}{s^2} * 0{,}07747m = 759{,}26\ Pa$$

2.1.6 Carga máxima

Volumen máximo sumergido total: 0,0483 m³, lo que equivale a una masa máxima total de aproximadamente 48,3 kg. La masa propia del skimer y la electrónica es de 13 kg. Considerando estos valores, se realiza una resta para calcular la carga máxima teórica que el skimer puede soportar durante el proceso de recolección.

m_c=48,3kg-13kg=35,3kg

Donde:
m_c=carga máxima

3. Pruebas y Análisis de Simulación en SolidWorks

3.1 Evaluación de la Resistencia y Estabilidad del Robot

Para realizar la simulación, se utilizó el software SolidWorks como herramienta de diseño CAD y análisis de modelos. Con este software, se obtuvo la simulación de movimiento de fluidos o Flow Simulation, con el objetivo de obtener una parametrización precisa. En la simulación, el modelo se sometió a una velocidad del viento de hasta 112 m/s, lo que representa condiciones extremas, y también se evaluó en condiciones más cercanas al ambiente real, con una velocidad del viento de 2,22221994 m/s y una presión de 77000 Pa. Además, se simuló la interacción del modelo con una superficie de agua con movimientos fuertes, con el fin de evaluar su máxima factibilidad en entornos agresivos.

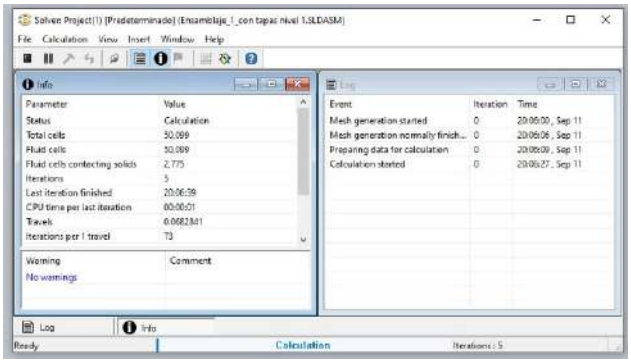


Fig. 4. Cuadro de cálculo.

En la selección de parámetros, el sistema de SolidWorks ofrece la posibilidad de seleccionar las zonas en las que se aplican las velocidades del viento y el contacto del agua. Esto permite emular la velocidad y trayectoria del viento, así como la presión que se ejerce en los puntos seleccionados, lo que se puede visualizar en la vista de capas.

Tabla 4. Parámetros de simulación

Parámetros de simulación				
Número de iteraciones	Velocidad del viento	Presión	Densidad del agua	Gravedad
42	2,22221994m/s	77000 Pa	1000 kg/m^3	9,81m/s^2

Considerando los datos del ambiente en el que se desarrollará la emulación del sistema robótico, se toma en cuenta el entorno en el que estará sometiendo el modelo.

2.5 Selección de Material para la Construcción del Skimmer.

Para seleccionar el material adecuado para la fabricación del skimmer, se creó una tabla gráfica comparativa que evaluó las propiedades fisicoquímicas de los materiales candidatos. Los criterios de selección clave incluyen:

- Resistencia térmica: la capacidad del material para mantener su integridad estructural y propiedades mecánicas en diferentes temperaturas.
- Resistencia a la absorción de agua: la capacidad del material para minimizar la absorción de humedad y evitar la degradación de sus propiedades mecánicas y el aumento de peso.
- Impermeabilidad: la capacidad del material para evitar la penetración de agua y garantizar la estabilidad y durabilidad del modelo en ambientes acuáticos.

La comparación sistemática de estos parámetros permitió identificar el material que ofrece el mejor equilibrio entre resistencia, durabilidad y funcionalidad para las condiciones de operación del skimmer.

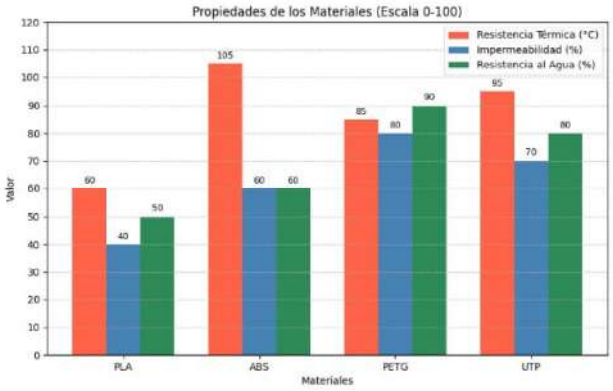


Fig. 5. Gráfico de propiedades de los materiales (escala 0-120).

Como se puede observar en la gráfica de propiedades, se muestran las características de resistencia térmica en el ambiente y los porcentajes que indican la resistencia al agua y la impermeabilidad del material para la flotabilidad del prototipo. Estos dos factores se encuentran en un rango de 0 a 120, donde 0 representa la menor resistencia y 120 la mayor resistencia.

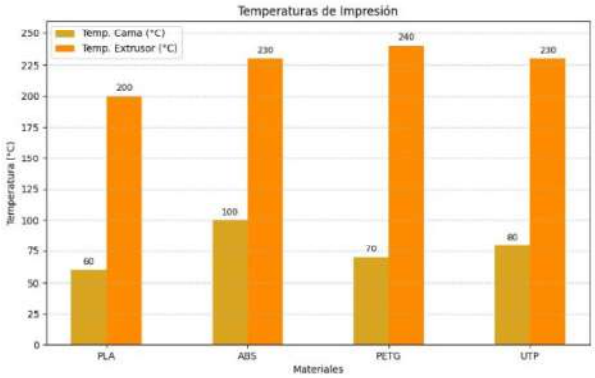


Fig. 6. Gráfico de temperaturas de impresión.

En el gráfico de temperaturas del proceso de impresión 3D, se muestran las proporciones térmicas para calentar el material en la etapa de deposición de filamento. En este gráfico, las líneas de color amarillo representan la temperatura de la cama de impresión, mientras que las líneas de color naranja indican la temperatura óptima para el extrusor para trabajar de manera eficiente.

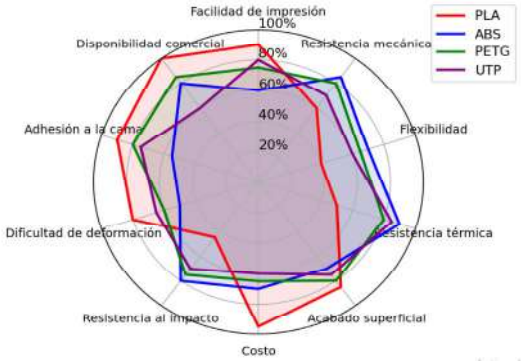


Fig. 7. Gráfico de radar con las características de los materiales.

En la Figura 7 se presentan las propiedades de los materiales propuestos para la fabricación del modelo, considerando factores como la disponibilidad comercial, facilidad de impresión, resistencia mecánica, flexibilidad, resistencia térmica, acabado superficial, resistencia al impacto, dificultad de deformación y adherencia de la cama de impresión. La suma de estos factores permite seleccionar el material más favorable para la realización del prototipo.
Como resultado del análisis, se seleccionó el material PETG, a pesar de presentar algunas limitaciones en acabado superficial. Sin embargo, ofrece un buen comportamiento térmico, resistencia al agua e impermeabilidad, lo que respalda un óptimo funcionamiento en condiciones reales.

3. Resultados y/o discusión

3.1 Análisis de la capacidad de carga y la estabilidad del modelo en el agua.

Tabla 5. Tabla de resultados del modelo matemático.

Magnitud	Valor	Unidad	Observación
Calado requerido	0.07747	m	Peso 20kg total
Freeboard	0.07349	m	Altura libre sobre el agua
I_wp	0.045791	m^4	Momento de inercia total
BM	2.28955	m	Radio metacéntrico-estabilidad transversal
KB	0.038735	m	Centro de carena
KG	0.51488	m	Centro de gravedad
GM	1.8134	m	Altura metacéntrica positiva-muy-estable
F_b	196.133	N	Fuerza de flotación
P_quilla	759.26	Pa	Presión en la quilla
Carga máxima	35.3	kg	Basura que puede soportar

En la tabla 5 se presentan los cálculos desarrollados con base en los parámetros del modelo, los cuales indican una buena estabilidad. Esto significa que el modelo tiene la capacidad de flotar en el agua y puede soportar una carga de residuos o contratiempos que se puedan presentar durante su operación. Por lo tanto, se puede afirmar que el modelo tiene una factibilidad para la flotación y una capacidad de carga de hasta 35 kilogramos de carga máxima, que incluye el peso de los componentes electrónicos y la carga para los desechos sólidos flotantes.

3.2 Resultados de simulación

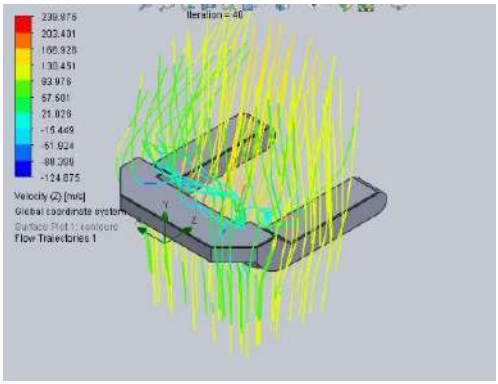


Fig. 8. Simulación de velocidad de aire

En la Figura 8 se muestra el campo de flujo de aire alrededor del modelo, así como las líneas de corriente que definen las trayectorias del fluido en contacto con la superficie del modelo. El análisis cualitativo de las líneas de corriente revela que, bajo las condiciones de presión y velocidad del aire simuladas, no se observan fenómenos de separación prematura de la capa límite ni inestabilidades significativas que afectan la integridad estructural o el desempeño aerodinámico del modelo.
Este comportamiento sugiere que la geometría del modelo ha sido diseñada de manera que minimiza la resistencia al avance y evita la formación de zonas de recirculación o turbulencia excesiva, incluso ante las velocidades de operación consideradas. La ausencia de problemas estructurales bajo carga aerodinámica indica que el diseño cumple con los criterios de resistencia y estabilidad requeridos para las condiciones de flujo analizadas.

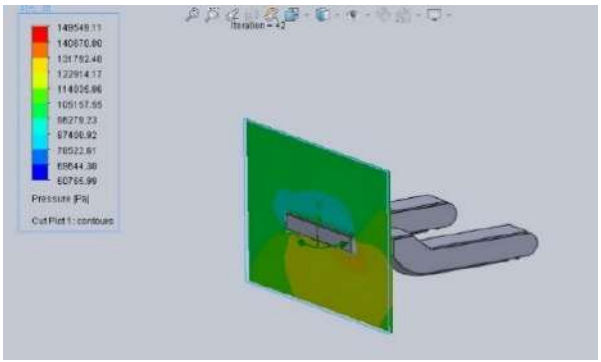


Fig. 9. Simulación por capas presión

La figura 9 muestra un mapeo paramétrico del modelo, donde se observa la distribución de presión del aire sobre la superficie superior del skimmer y el flujo de agua en la región del casco. Los resultados obtenidos indican que:

- La presión aerodinámica sobre la superficie del modelo no presenta valores críticos ni gradientes abruptos, lo que sugiere una interacción fluida sin puntos de estancamiento o sobrepresiones significativas que puedan comprometer la integridad estructural.
- El flujo hidrodinámico alrededor del casco muestra un comportamiento laminar y estable, sin evidencia de separación de capa límite ni formación de vórtices que afectan la navegabilidad o la eficiencia de recolección.

La parametrización del modelo demuestra una optimización óptima entre la geometría del casco y las condiciones de flujo, resultando en un perfil de presiones equilibrado tanto en la interfaz aire-modelo como en la interfaz agua-casco. Esto confirma que el diseño cumple con los requisitos de baja resistencia al avance y estabilidad hidrodinámica, incluso bajo las condiciones de operación simuladas. Por lo tanto, el modelado de las velocidades asignadas tiene una buena respuesta con datos teóricos de condiciones de ambiente extremo en las zonas lacustres, lo que lo hace adecuado para la recolección de residuos sólidos flotantes.

3.3 Evaluación de la flotabilidad y la navegabilidad del robot en condiciones reales.

El sistema físico del robot se encuentra actualmente en etapa de pruebas en la zona chinampera de Tláhuac, donde ha demostrado un buen desempeño de flotabilidad en condiciones reales.
La figura 10 muestra una imagen del robot en pruebas físicas en campo, donde se puede apreciar su capacidad para flotar y navegar en el agua de manera estable y segura. Durante las pruebas, el robot ha demostrado ser capaz de recolectar desechos y residuos de manera efectiva, lo que es un aspecto clave para su función principal. Además, no se han presentado problemas de flotabilidad o estabilidad, lo que confirma su diseño y construcción.

Fig. 10. Pruebas del robot recolector en la zona chinampera de Tláhuac.

La figura 11 muestra el robot recolector de desechos equipado con sensores PIR y una cámara, que le permiten detectar y recolectar desechos de manera autónoma y eficiente en un entorno dinámico y cambiante.

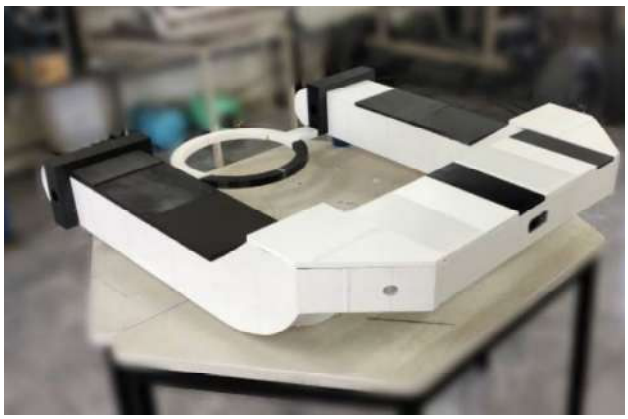


Fig. 11. Robot Recolector con Sistema de Sensores.

La Figura 12 muestra el robot recolector de desechos sólidos en su primera fase de desarrollo, equipado con sensores PIR y una cámara.
Los sensores PIR detectan la presencia de objetos en el entorno del robot, mientras que la cámara proporciona una visión más detallada de los desechos, permitiendo al robot identificar y clasificarlos de manera más precisa.

Fig. 12. Esquema de Ubicación del Robot Recolector.

La combinación de los sensores PIR y la cámara permite que el robot recolector de desechos funcione de manera autónoma y eficiente, detectando y recolectando desechos en un entorno dinámico y cambiante.

4.CONLCUSIONES

El diseño y la construcción del robot acuático han demostrado ser un éxito en términos de optimización y eficiencia. El uso de software de diseño CAD y fabricación aditiva ha permitido la creación de un sistema de recolección de desechos sólidos que es resistente, flotante y capaz de operar en condiciones adversas. Las pruebas de campo han demostrado que el robot tiene un excelente comportamiento, con buena flotabilidad y resistencia a las condiciones del entorno.

Además, los resultados de la simulación de flujo hidrodinámico y aerodinámico han demostrado que el diseño del robot cumple con los requisitos de baja resistencia al avance y estabilidad hidrodinámica, incluso bajo condiciones de operación extremas. La distribución de presión sobre la superficie del modelo no presenta valores críticos ni gradientes abruptos, lo que sugiere una interacción fluida sin puntos de estancamiento o sobrepresiones significativas que pueden comprometer la integridad estructural.

De manera similar, el análisis del campo de flujo de aire alrededor del modelo ha demostrado que la geometría del robot ha sido diseñada de manera que minimiza la resistencia al avance y evita la formación de zonas de recirculación o turbulencia excesiva, incluso ante las velocidades de operación consideradas.

En cuanto a la selección de materiales, se ha demostrado que el PETG es un material adecuado para la fabricación del robot, debido a su buen comportamiento térmico, resistencia al agua e impermeabilidad.

Trabajo futuro: En el futuro, se propone que el robot tenga su propia red para la validación de datos y comparación de imágenes de la web con las que puede comparar para la sustracción de residuos. También se propone la integración de redes neuronales por medio de IA (Inteligencia Artificial) orientada a que se utilice como un sistema de limpieza autónomo que necesita poca asistencia del ser humano para su operación. El control manual del robot utilizando tecnologías IoT permitirá una mayor eficiencia y seguridad en su operación. En cuanto a la energía, se pretende agregarle energías renovables, específicamente energía fotovoltaica, para que el robot pueda operar de manera autónoma y sostenible.

REFERENCIAS

SEMARNAT; (INECC), 2020. Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (DBGIR), Méxco: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) / Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

Baggio, A., 2022. Procedimento para seleção otimizada de um propulsor da série GAWN-Burill: Estudo de caso Babitonga., Brasil: Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC).

Comisión Nacional del Agua, 2023. Atlas del Agua en México. 1° edición ed. Ciudad de México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos naturales (SEMARNAT) / Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

CONABIO, 2020. Informe de actividades 2017-2019, México: CONABIO.

Jhon, E. M., 2025. An Introduction to SOLIDWORKS Flow Simulation 2025. 1.ª ed. ed. Mission, KS: SDC Publications.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2006. Directrices técnicas para la pesca responsable: Suplemento 4. Gestión de la pesca de captura, Roma, Italia : Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Philip, A. W., 2018. Arquitectura naval básica: estabilidad del buque. 1.ª edición ed. Cham, Suiza: Springer Nature Switzerland AG.

SEMARNAT, 2024. Problematica de los residuos y los malos habitos. [En línea] Available at: https://www.gob.mx/semarnat/articulos/problematica-de-la-basura-y-malos-habitos?idiom=es [Último acceso: 20 septiembre 2025].

Simplify3D, 2025. Materials Guide. [En línea] Available at: https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/ [Último acceso: 16 septiembre 2025].

Ultimaker Material Guidelines, s.f. Ultimaker Material Guidelines. [En línea] Available at: https://ultimaker.com/materials

World Health Organization, 2024. Solid waste, Geneva: World Health Organization.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Parameterization and Quadratic Linear Regulator with Complementary Filter of Self-Balancing Robot

Ramírez Nava, Luis Ángel * **Magos Mejía, Anahí** *
Serna Hernández, Luis Felipe *
Espíndola Lugo, Miguel Ángel *

* *Tecnológico Nacional de México / ITS de Huichapan, El Saucillo Huichapan Hidalgo, México (e-mail: larn9808@gmail.com, a18021178@iteshu.edu.mx ,lfserna@iteshu.edu.mx, maespindola@iteshu.edu.mx) .*

Abstract: This paper presents the design, modeling, simulation, and implementation of a two-wheeled self-balancing robot. The system employs a *myRIO-1900* board with an IMU sensor to estimate the tilt angle and optical encoders to measure the angular velocity of the wheels. The dynamic model was obtained through state-space analysis and parameterized using SolidWorks. The control architecture is based on a hierarchical scheme composed of a Linear Quadratic Regulator (LQR) for balance control and PID controllers for wheel speed regulation. In simulation, the PID achieved a 3.56% overshoot, a settling time of 0.107 s, and zero steady-state error, while the LQR stabilized the tilt angle in 1.62 s with nearly zero final error and 9.2% overshoot. Experimentally, the robot maintained its vertical position with an average error of 0.2° and stable oscillations within ±5. The results demonstrate that the integration of the LQR and PID controllers ensures a fast, stable, and robust response against external disturbances.

Keywords: Dynamic model, LQR, PID, low-pass, complementary filter, self-balancing robot.

1. INTRODUCCIÓN

La problemática que resuelve la estabilización de un robot autobalanceado es un tema de particular interés para la ingeniería de control, debido a que es uno de los sistemas con mayor complejidad por su carácter no lineal y la cantidad de variables que interactúan en el modelo al considerar la dinámica de los actuadores. Esto ha llevado a que se busque implementar técnicas de control óptimas que permitan poner en estado de equilibrio a este tipo de sistemas.

El desarrollo de un robot autobalanceado requiere afrontar no sólo el diseño del controlador, sino que también implica el conocimiento de la ingeniería mecánica y electrónica, donde interactúan variables como el peso, las inercias del sistema, los actuadores y los sensores; es decir, las variables dinámicas del sistema. Normalmente se usan algoritmos para estimar dichas variables (Sarathy et al. (2018); Frankovský et al. (2017)). Al modelar un robot autobalanceado o tipo "péndulo invertido sobre ruedas", se obtienen modelos no lineales cuya matriz de controlabilidad puede no tener rango completo, lo que obliga a linealizar para aplicar técnicas de control lineal como retroalimentación de estados.

En trabajos previos se han usado controladores tipo PID, LQR y asignación de polos para mantener el robot de forma vertical, en conjunto con filtros complementarios y filtros de Kalman para la eliminación o atenuación del ruido proporcionado por los sensores o la estimación de velocidad. Estos algoritmos de control se han implementado sobre hardware como tarjetas myRIO, Arduino y plataformas de National Instruments (Langley (2016); García et al. (2016); Migchelbrink et al. (2015); Mak (2015); Juang and Lum (2013); Thao et al. (2010); Ooi (2003)). Sin embargo, muchas veces no se detallan los pasos de parametrización del modelo, esenciales para la obtención del controlador.

El trabajo de Mishra and Bansal (2024) presenta un controlador LQR con retroalimentación de estados que incorpora el modelo del actuador y un controlador PID para el lazo de velocidad. Sin embargo, este enfoque no incluye el diseño de filtros, a diferencia de Putra et al. (2025), donde se implementan filtros complementarios pero se omite la dinámica del actuador.

El trabajo se organiza de la siguiente manera: el apartado dos muestra el diseño mecánico, la parametrización y el modelo matemático, haciendo uso del software Solidworks para la obtención de inercias, también se presenta la obtención del modelo del motor. En el apartado tres se presenta la obtención del regulador LQR y las ganancias del control PID para el control de las velocidades. La sección cuatro muestra las funciones de transferencia de los filtros. En la sección cinco se muestran los resultados obtenidos y, por último, la conclusión.

2. PARAMETRIZACIÓN Y MODELADO MATEMÁTICO

El modelo matemático que describe la dinámica del sistema está compuesto por un péndulo invertido montado sobre un carro de dos ruedas. Para garantizar que el controlador LQR sea capaz de mantener al robot en equilibrio, es necesario considerar la dinámica de los actuadores; esto lleva a un modelo más aproximado. Sin embargo, antes es necesario obtener las variables de parametrización del robot.

2.1 Parametrización

Se realiza el diseño CAD del robot que se muestra en la figura 1, debido a que en el modelo dinámico interactúan parámetros físicos como las masas, los momentos de inercia y los centros de masas, siendo estos los más difíciles de obtener de forma analítica.

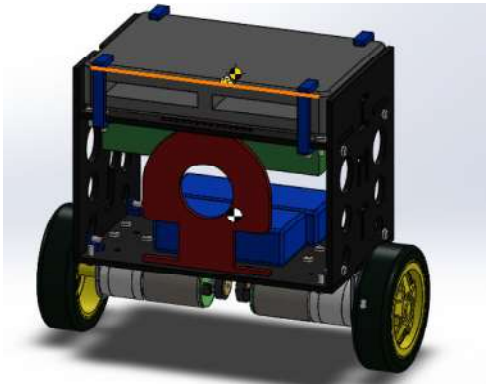


Fig. 1. CAD en Solidworks de robot autobalanceado

Para el análisis dinámico del robot, se estableció un marco de referencia inercial en el eje central de las ruedas, considerando el eje y como el eje de rotación de las mismas y el eje x como la dirección del desplazamiento lineal del robot. De esta manera, el movimiento de avance y retroceso ocurre sobre el eje x, mientras que el equilibrio angular se analiza respecto al eje y.

Con el fin de obtener los parámetros físicos de interés, cada componente del robot (motores, batería, placa NI myRIO-1900 y ruedas) fue modelado en SolidWorks siguiendo las dimensiones y masas especificadas en sus hojas de datos. Posteriormente, se introdujeron las propiedades del material del chasis —acrílico de 3 mm de espesor— y se asignaron los centros de masa correspondientes a cada cuerpo. Los momentos de inercia reportados fueron calculados por SolidWorks respecto al marco de referencia ubicado en el eje de las ruedas, tomando como ejes principales los definidos por el sistema coordenado (x, y, z) del modelo CAD.

En la figura 2 se presenta el prototipo físico del robot autoequilibrado, mientras que en la Tabla 1 se listan los parámetros físicos utilizados en el modelo dinámico, junto con los valores característicos del motor descritos en el siguiente apartado.

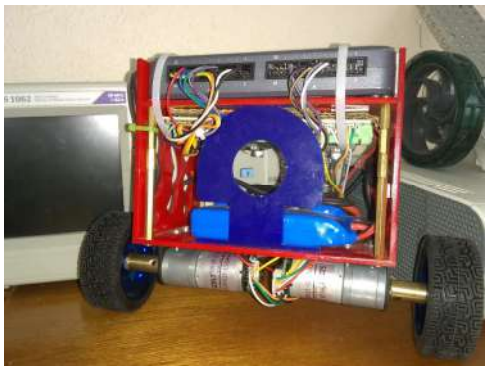


Fig. 2. Prototipo de robot autoequilibrado. El marco de referencia se define con origen en el eje de las ruedas.

Tabla 1. Parámetros para el modelado del Robot

Parámetro	**Valor numérico**	**Unidades**	**Símbolo**
Masa del Cuerpo del Robot	0.855	Kg	M_p
Masa de las Ruedas	0.060	Kg	M_r
Momento de Inercia del Cuerpo	0.00313442	Kgm^2	I_c
Momento de Inercia de las Ruedas	0.00004326	Kgm^2	I_r
Radio de las Ruedas	0.034	m	r
Distancia del cuerpo al centro de masa	0.03927	m	l
Constante de aceleración de gravedad	9.81	$\frac{m}{s^2}$	g
Voltaje nominal aplicado a los motores	8.2	V	V_a
Resistencia nominal de los motores	2.5	Ω	R
Constante de torque electromagnético	0.0063	-	k_m
Constante de fuerza contra-electromotriz	0.0099	-	k_a
Momento de inercia del motor	0.0000020311	Km^2	J
Inductancia del motor	0.000128	H	L_i

2.2 Modelado

La obtención del modelo precisa de la dinámica del motor de CC a partir de su comportamiento eléctrico y mecánico; el diagrama se muestra en la figura 3. La relación del voltaje suministrado a estos actuadores V_a con el par transmitido a las ruedas τ_m está descrita por las siguientes ecuaciones:

$$V_a(t) = R_i i_i(t) + L_i \frac{di}{dt} + U_m(t) \quad (1)$$

$$K_m i_i(t) = J\frac{d\dot{\theta}(t)}{dt} + B\dot{\theta}(t) \quad (2)$$

$$U_m(t) = K_a\dot{\theta}(t) \quad (3)$$

$$\tau_m(t) = K_m i_i(t) \quad (4)$$

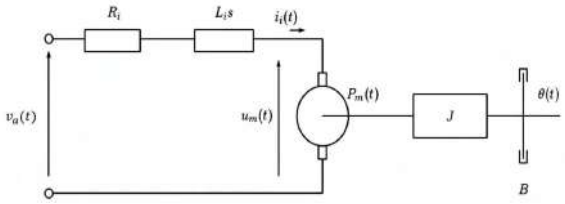


Fig. 3. Diagrama de motor CC de imán permanente

Las constantes k_m, L_i, J y k_a se obtuvieron a partir de la aplicación del algoritmo de Steiglitz-McBride en el software de Matlab. Se utiliza la función de transferencia de corriente con respecto al voltaje Rico (2005).

Relacionando el modelo anterior con las fuerzas que actúan sobre las ruedas, mediante las leyes del movimiento de Newton, a partir del diagrama de cuerpo libre de la figura 4, se obtienen las ecuaciones que describen la dinámica del movimiento de las ruedas.

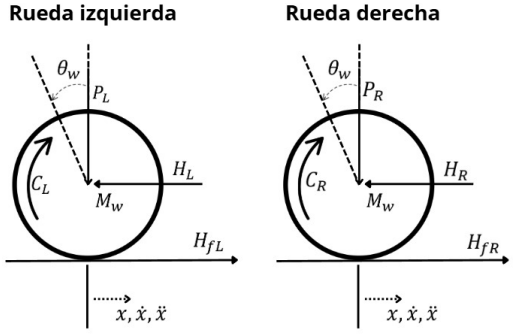


Fig. 4. Diagrama de cuerpo libre, ruedas del robot (Ooi (2003))

Para la rueda derecha:

$$M_r\ddot{x} = \frac{-k_m k_a}{Rr^2}\dot{x} + \frac{k_m}{Rr}V_a - \frac{I_r}{r^2}\ddot{x} - H_R \quad (5)$$

Para la rueda izquierda:

$$M_r\ddot{x} = \frac{-k_m k_a}{Rr^2}\dot{x} + \frac{k_m}{Rr}V_a - \frac{I_r}{r^2}\ddot{x} - H_L \quad (6)$$

Donde $x, \dot{x}, \ddot{x}$ representan desplazamiento, velocidad y aceleración, respectivamente, y H_R, H_L las fuerzas de reacción sobre las ruedas.

Sumando ambas reacciones se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$2(M_r\ddot{x} + \frac{I_r}{r^2}) = \frac{-2k_m k_a}{Rr^2}\dot{x} + \frac{2k_m}{Rr}V_a - (H_R + H_L) \quad (7)$$

El análisis del cuerpo del robot se basa en el diagrama de cuerpo libre de un péndulo invertido mostrado en la figura 5. La ecuación del movimiento del péndulo de forma horizontal es:

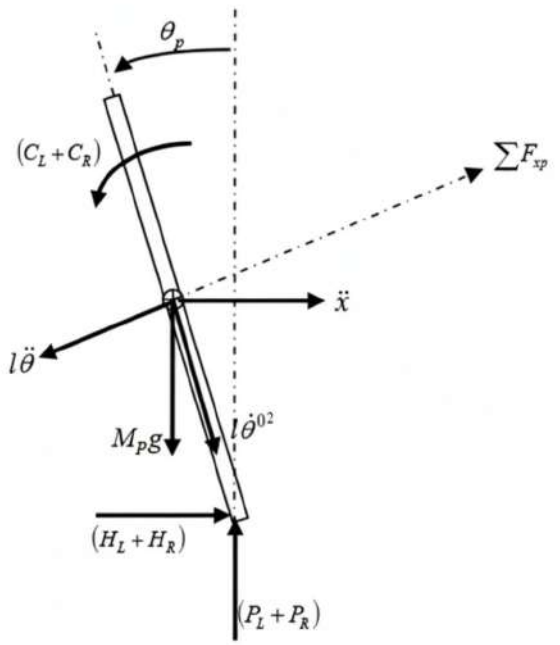


Fig. 5. Diagrama de cuerpo libre del cuerpo del robot (Ooi (2003))

$$(H_L + H_R) - M_p l\ddot{\theta}_p\cos\theta_p + M_p l\dot{\theta}_p^2\sin\theta_p = M_p\ddot{x} \quad (8)$$

La ecuación del movimiento vertical:

$$\begin{aligned}(H_L + H_R)\cos\theta_p - (P_l + P_R)\sin\theta_p + M_p g \\ \sin\theta_p + M_p l\ddot{\theta}_p = M_p\ddot{x}\cos\theta_p\end{aligned} \quad (9)$$

Finalmente, uniendo estas ecuaciones se obtiene:

$$\begin{aligned}\ddot{\theta} = \frac{M_c l}{(I_c + M_c l^2)}\ddot{x} + \frac{2k_m k_a}{Rr(I_c + M_c l^2)}\dot{x} - \\ \frac{2k_m}{R(I_c + M_c l^2)}V_a + \frac{M_c g l}{(I_c + M_c l^2)}\phi\end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}\ddot{x} = \frac{2k_m}{Rr(2M_r + \frac{2I_r}{r^2} + M_c)}V_a - \frac{2k_m k_a}{Rr^2(2M_r + \frac{2I_r}{r^2} + M_c)}\dot{x} + \\ \frac{M_c l}{(2M_r + \frac{2I_r}{r^2} + M_c)}\ddot{\theta}\end{aligned} \quad (11)$$

La representación en espacio de estados:

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \ddot{x}\\ \dot{\theta}\\ \ddot{\theta}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & \frac{2k_m k_a(M_c lr - I_c - M_c l^2)}{Rr^2\alpha} & \frac{M_c^2 g l^2}{\alpha} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & \frac{2k_m k_a(r\beta - M_c l)}{Rr^2\alpha} & \frac{M_c g l\beta}{\alpha} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\ \dot{x}\\ \theta\\ \dot{\theta}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ \frac{2k_m(I_c + M_c l^2) - M_c lr}{Rr\alpha}\\ 0\\ \frac{2k_m(M_c l - r\beta)}{Rr\alpha}\end{bmatrix} \quad (12)$$

En donde:

$$\beta = (2M_r + \frac{2I_r}{r^2} + M_p)$$

y;

$$\alpha = [I_c\beta + 2M_c l^2(M_r + \frac{I_r}{r^2})]$$

Como se puede observar, el modelo integra la dinámica del actuador, dando pauta a una descripción más precisa del modelo dinámico.

3. CONTROLADOR

La estrategia de control general implementada para el robot autoequilibrado se muestra en el diagrama de bloques de la figura 6. El controlador LQR se encarga de mantener el equilibrio del robot al generar las referencias de velocidad angular que deben seguir las ruedas, mientras que los controladores PID regulan la velocidad de los motores de corriente continua (CC) de manera independiente. La interacción de ambos controladores permite que el sistema conserve la posición vertical y responda adecuadamente ante perturbaciones externas.

3.1 Control PID

El controlador PID se emplea para regular la velocidad angular de cada rueda, asegurando que éstas sigan la referencia generada por el LQR con precisión y estabilidad. Su estructura está dada por la ecuación clásica:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)\, d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \tag{13}$$

donde $e(t)$ es el error entre la velocidad de referencia y la velocidad medida, y K_p, K_i, y K_d son las ganancias proporcional, integral y derivativa, respectivamente. La acción proporcional corrige el error instantáneo, la integral elimina el error en régimen permanente y la derivativa anticipa el comportamiento del sistema para reducir el sobreimpulso.

A partir de las ecuaciones 1, 2, 3 y 4, se obtiene la función de transferencia que relaciona la velocidad angular del eje del motor con el voltaje de entrada:

$$\frac{\dot{\theta}_r(s)}{V_a(s)} = \frac{-36.3255s + 134.642}{1644.24s^2 + 47.0818s + 1}. \tag{14}$$

El diseño del controlador se realizó mediante la herramienta *pidtool* de *Matlab*, ajustando los parámetros para obtener una respuesta con bajo sobreimpulso, error estacionario mínimo y estabilidad ante perturbaciones. Las constantes resultantes fueron:

- $K_p = 0.0058313$
- $K_i = 0.00013259$
- $K_d = 0.064115$

La respuesta simulada mostró que el controlador PID proporciona una regulación estable de la velocidad, con una transición suave hacia el régimen permanente, garantizando así el seguimiento adecuado de la referencia impuesta por el controlador LQR.

3.2 Controlador LQR

El problema de control óptimo busca determinar un vector de control admisible $u(t)$ que transfiera el estado del sistema hacia una región deseada del espacio de estados, minimizando al mismo tiempo un índice de desempeño cuadrático.

El modelo dinámico del robot autobalanceado, originalmente no lineal, se linealizó alrededor del punto de equilibrio correspondiente a $\theta = 0$ (posición vertical del robot). Este proceso permitió expresar la dinámica en la forma de espacio de estados:

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{15}$$

$$y = Cx + Du \tag{16}$$

donde $x = [x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}]^T$ representa el vector de estados, siendo x el desplazamiento lineal del robot y θ el ángulo de inclinación respecto al eje vertical.

Sustituyendo los parámetros obtenidos mediante SolidWorks y las hojas de datos de los componentes (tabla 1), se obtuvieron las siguientes matrices del sistema linealizado:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0103 & 3.4406 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.3016 & 99.9117 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -6.4727 \\ 0 \\ -189.805 \end{bmatrix}$$

$$C = [0\ 0\ 1\ 0], \quad D = [0]$$

La matriz de controlabilidad se define como:

$$\mathcal{C} = [B \quad AB \quad A^2B \quad A^3B] \tag{17}$$

y debe poseer rango completo para garantizar que todos los estados sean controlables. Este requisito se verificó satisfactoriamente para el sistema propuesto.

El controlador LQR se diseña con el objetivo de minimizar la función de coste cuadrática:

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u)\, dt \tag{18}$$

donde Q penaliza la desviación de los estados respecto al equilibrio y R penaliza la magnitud de la señal de control. Tras diversas simulaciones en *Matlab*, se seleccionaron las siguientes ponderaciones:

$$Q = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = [0.001]$$

La ecuación de Riccati algebraica asociada:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \tag{19}$$

se resolvió numéricamente en *Matlab*, obteniéndose la matriz de ganancia óptima K dada por:

$$u = -Kx \tag{20}$$

$$K = \begin{bmatrix} -1.0000 \times 10^{-1} & -2.0498 & -4.4579 \times 10^{3} & -4.5141 \times 10^{2} \end{bmatrix}$$

Esta ley de control genera las referencias de velocidad que estabilizan el robot en posición vertical, minimizando el esfuerzo de control y garantizando una respuesta rápida ante perturbaciones.

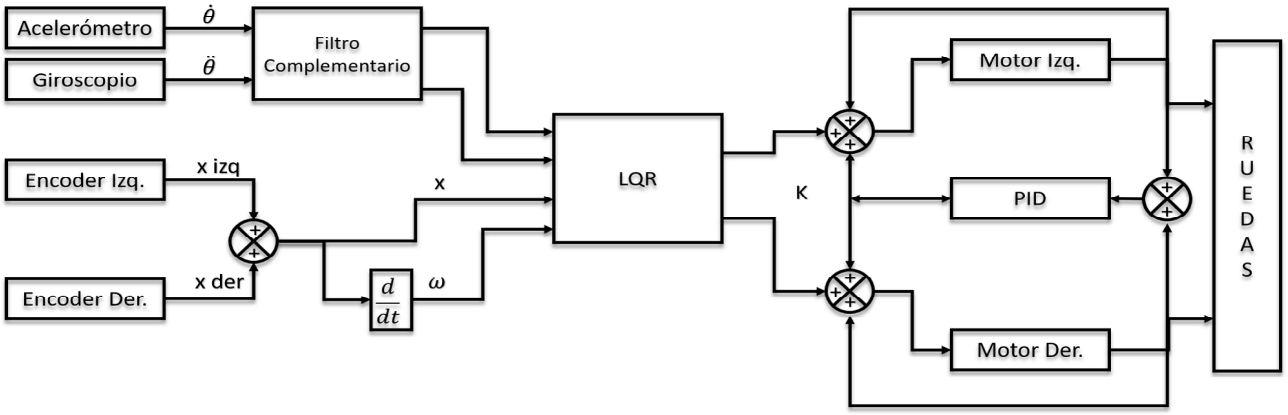


Fig. 6. Diagrama de bloques general del sistema de control del robot autoequilibrado.

4. FILTRO COMPLEMENTARIO

Para mejorar la respuesta del controlador se propone la implementación de un filtro complementario, el cual suma las señales del acelerómetro y giroscopio de una IMU6050, permitiendo obtener una señal con menos ruido. Para ello se diseñó un filtro complementario siguiendo el esquema de la figura 7.

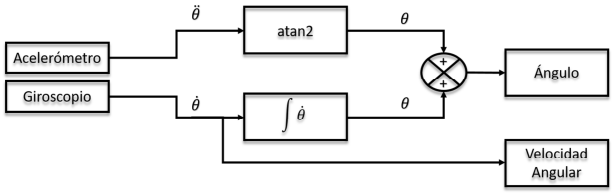


Fig. 7. Diagrama de bloques del filtro complementario

El filtro pasa altas de segundo orden para el acelerómetro, y un pasa-bajas de segundo orden para el giro, con una frecuencia de corte de 100Hz, que podemos observar en su función de transferencia en las ec. 21 y 22 respectivamente.

$$H_1(s) = \frac{0.6389s^2 - 1.2779s + 0.6389}{s^2 - 1.1430s + 0.4128} \tag{21}$$

$$H_1(s) = \frac{0.0675s^2 - 0.1349s + 0.0675}{s^2 - 1.1430s + 0.4128} \tag{22}$$

5. RESULTADOS

5.1 Resultados del control PID de velocidad

El robot autobalanceado de dos ruedas utiliza controladores PID independientes para regular la velocidad angular de cada motor, de modo que el movimiento lineal y el equilibrio se mantengan de forma coordinada con el lazo LQR. El objetivo del controlador PID es garantizar un seguimiento preciso de la referencia de velocidad, minimizando los errores y proporcionando una respuesta rápida ante cambios en la consigna.

Para validar el diseño del controlador, se realizaron simulaciones y pruebas experimentales. En la simulación, se aplicó una entrada tipo escalón unitario para analizar la respuesta dinámica del sistema bajo las constantes obtenidas con la herramienta *pidtool* de MATLAB. La figura 9 muestra la respuesta simulada, mientras que la figura 10 presenta los resultados experimentales, donde se aplicó una señal de referencia senoidal con el fin de evaluar el comportamiento del control ante variaciones continuas de velocidad.

En la simulación del control de velocidad, los parámetros de desempeño obtenidos fueron: sobreimpulso de 3.56%, tiempo pico de 0.0137 ms, tiempo de establecimiento (2%) de 0.107 ms y error en estado estacionario de 0 RPM, lo que demuestra un control estable y con respuesta rápida.

Durante la implementación experimental, se obtuvo un error en estado estacionario de 0.6749 RPM y un error cuadrático medio (RMSE) de 1.0216 RPM. Estos resultados muestran que el PID mantiene un seguimiento adecuado de la velocidad de las ruedas, compensando pequeñas perturbaciones debidas a la fricción, variaciones en el voltaje de alimentación y discretización del sensor.

En conjunto, el desempeño del PID garantiza que las velocidades de ambas ruedas sigan las referencias generadas por el controlador LQR, contribuyendo de manera significativa a la estabilidad global del robot y al mantenimiento de su posición vertical.

5.2 Resultados del control LQR y desempeño del robot autoequilibrado

El controlador LQR se diseñó con el objetivo de mantener el robot en posición vertical, minimizando la desviación angular y el esfuerzo de control. La figura 8 muestra la simulación de la respuesta del sistema ante un impulso unitario. El controlador logra estabilizar el ángulo en aproximadamente 1.62 s, con un error final cercano al 0%, un máximo desplazamiento angular de 1.6° y un sobreimpulso de 9.2%. Estos resultados demuestran un desempeño estable y rápido, sin oscilaciones sostenidas.

Los autovalores del sistema cerrado,

$$\lambda = [-10.5755,\ -9.2123,\ -2.2341,\ -0.0316],$$

se encuentran en el semiplano izquierdo del plano complejo, lo que confirma la estabilidad asintótica del sistema en lazo cerrado. El tiempo de establecimiento al 2% fue de

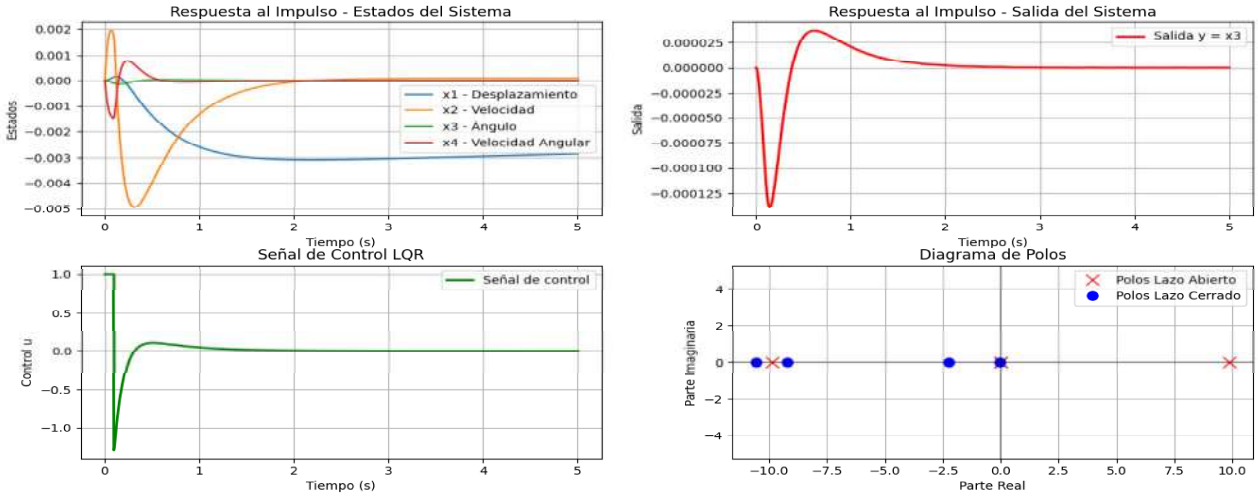


Fig. 8. Rresultados de la simulación del controlador LQR. En la primera gráfica se muestra la evolución temporal de los estados del sistema ante una entrada tipo impulso. La segunda gráfica representa la respuesta del sistema correspondiente al tercer estado, el cual describe el ángulo de inclinación del robot. En la tercera gráfica se observa la señal de control generada por el regulador LQR, la última gráfica muestra la ubicación de los eigenvalores del sistema en lazo abierto y en lazo cerrado.

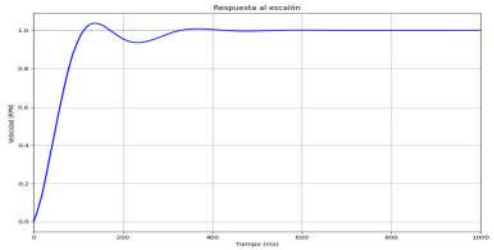


Fig. 9. Respuesta simulada del controlador PID de velocidad ante entrada escalón.

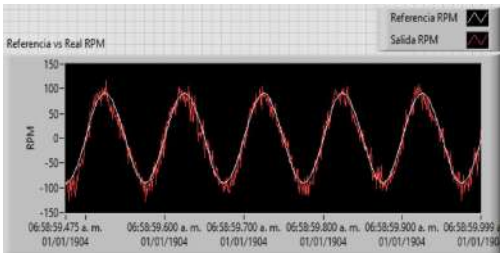


Fig. 10. Seguimiento experimental de la referencia de velocidad en RPM con control PID.

5.0 s, con valor final de la salida de 0.0 y sin desviaciones sostenidas, validando que el diseño de Q y R logra un compromiso adecuado entre rapidez y energía de control.

En la implementación experimental, el robot se mantiene en posición vertical con un error promedio de 0.2°, lo que indica una ligera oscilación alrededor del punto de equilibrio. Esta oscilación se mantiene dentro de límites seguros mientras no se presenten perturbaciones superiores a 5°, valor a partir del cual el sistema tiende a perder estabilidad. La figura 12 presenta la respuesta experimental con control LQR de inclinación obtenida mediante el filtro complementario, evidenciando una reducción significativa del ruido respecto a la señal sin filtrado. El filtro mejora

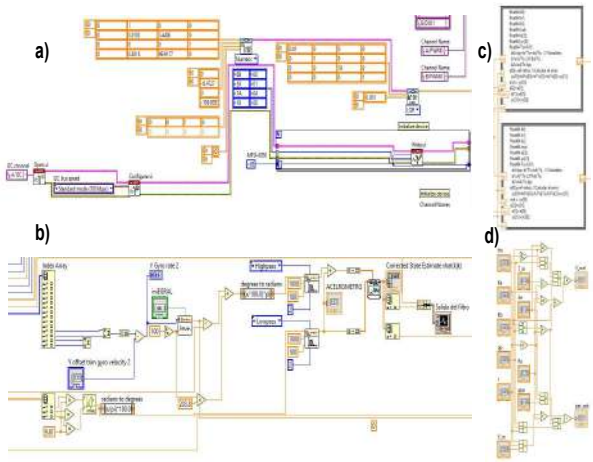


Fig. 11. Implementación del controlador LQR en LabVIEW: (a) lazo de control, (b) filtro complementario, (c) control PID de velocidad, (d) modelo del motor.

la estimación del ángulo y evita respuestas espurias del actuador, contribuyendo directamente a la estabilidad del sistema.

El controlador LQR fue implementado en el entorno LabVIEW, integrando los bloques de control, el modelo del motor y el filtro complementario, como se observa en la figura 11. La estructura modular del programa permite modificar los parámetros de control y monitorear en tiempo real las variables del sistema, lo que facilitó la validación experimental y la sintonización fina de los parámetros Q y R.

El desempeño combinado del LQR–PID permitió mantener el robot en equilibrio dinámico con una respuesta suave y estable. Mientras el LQR regula el ángulo de in-

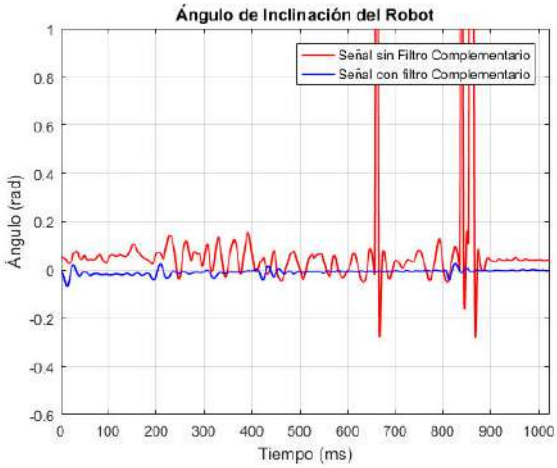


Fig. 12. Comparación experimental de la señal de inclinación del robot bajo la acción de control LQR y PID con y sin filtro complementario.

clinación, los controladores PID garantizan el seguimiento preciso de las velocidades de las ruedas, logrando un comportamiento coordinado que reduce la oscilación y mejora la respuesta ante pequeñas perturbaciones. En conjunto, la experimentación valida la robustez del enfoque propuesto, logrando que el robot conserve su posición vertical sin caídas ante variaciones menores del terreno o del centro de masa.

6. CONCLUSIÓN

Se diseñó e implementó con éxito una estrategia de control en espacio de estados para un robot autobalanceado. El esquema principal se basó en un controlador LQR, responsable de mantener el equilibrio del robot en su posición vertical. Este controlador genera referencias de velocidad que son ejecutadas por un controlador PID, encargado de la regulación de los motores de corriente continua que proveen el par necesario para la estabilización.

Para una estimación robusta de los ángulos de inclinación, se implementó un filtro complementario que fusiona de manera efectiva las mediciones del acelerómetro y el giroscopio. Esta fusión de sensores permitió obtener una señal de orientación más precisa y con menor deriva, lo que resultó en una realimentación de estados más confiable y, en consecuencia, en un desempeño general de control significativamente mejorado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al TecNM por el financiamiento del proyecto con clave 422.16-PD.

REFERENCIAS

Frankovský, P., Dominik, L., Gmiterko, A., Virgala, I., Kurylo, P., and Perminova, O. (2017). Modeling of two-wheeled self-balancing robot driven by dc gearmotors. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 22, 739–747.

García, J., Ramírez, L., Siordia, X., and Martínez, T. (2016). Las leyes de newton en el modelado y control del péndulo invertido sobre un carro. *Revista Tecnología e Inovación*, 3, 11–19.

Juang, H.S. and Lum, K.Y. (2013). *Design and Control of a Two-Wheel Self-Balancing Robot using the Arduino Microcontroller Board*. 2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA).

Langley, R. (2016). *Development of a Self-Balancing Robot utilizing FPGA*. Ph.D. thesis.

Mak, Y. (2015). *Realization of Mini Segway Robot Using NI MyRIO*. Ph.D. thesis.

Migchelbrink, M., White, W.N., Gorentz, L., Wagner, J., and Blankenau, B. (2015). Design, build, and test of an autonomous myrio based segbot. *2015 American Control Conference*.

Mishra, A. and Bansal, K. (2024). Control of two-wheel self-balancing robot: Lqr and mpc performance analysis. In *2024 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, 1–6. IEEE.

Ooi, R.C. (2003). *Balancing a two-wheeled autonomous robot*. Ph.D. thesis.

Putra, L.G.B., Wahab, F., and Tamba, T.A. (2025). Design and implementation of linear quadratic regulator control for two-wheeled self-balancing robot. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 14(2), 931–939.

Rico, F.H. (2005). *Estimación de los parámetros físicos de un motor de corriente directa usando el algoritmo de Steiglitz-McBride,"*. Ph.D. thesis, Tesis de maestría con espacialidad en ingeniería eléctrica, Instituto ....

Sarathy, S., Hibah, M., S, A., and Kalaivani, S. (2018). Implementation of efficient self balancing robot. *2018InternationalConferenceon RecentTrends in Electrical, Control andCommunication(RTECC)*., 18.

Thao, N.G.M., Nghia, D.H., and Phuc, N.H. (2010). A pid backstepping controller for two-wheeled self-balancing robot. *International Forum on Strategic Technology 2010*.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Kinematic Modeling and Simulation of a 4-DOF Manipulator in ROS2

Enrique García-Trinidad [*] **Emmanuel Arcos-Hernández** [**]
Jesús Martínez-Martínez [***]

[*] *Tecnológico Nacional de México campus Huixquilucan, Estado de México, C.P. 52773 (e-mail: enrique.g.t@huixquilucan.tecnm.mx).*
[**] *Tecnológico Nacional de México campus Huixquilucan, Estado de México, C.P. 52773 (e-mail: emmanuel.a.h@huixquilucan.tecnm.mx).*
[***] *Tecnológico Nacional de México campus Huixquilucan, Estado de México, C.P. 52773 (e-mail: jesus.m.m@huixquilucan.tecnm.mx).*

Abstract: Robotic simulation is a critical tool for research and education, especially in emerging economies facing hardware cost barriers. This paper presents a comprehensive framework for the kinematic modeling, simulation, and validation of a 4-DOF robotic manipulator using ROS 2. The methodology covers the complete process, starting from the derivation of the forward and inverse kinematics using the Denavit-Hartenberg (D-H) convention. Both analytical and numerical methods for the inverse kinematics are implemented and evaluated. The mathematical model is then systematically translated into a Unified Robot Description Format (URDF) file for high-fidelity simulation and visualization in RVIZ 2. The results demonstrate a strong consistency and equivalence between the analytical solutions, the numerical algorithm outputs, and the interactive simulation. This validated and reproducible framework provides an accessible educational tool and a solid baseline for future research in dynamic simulation and advanced control applications.

Keywords: Robotic Manipulator, Inverse Kinematics, ROS2, Simulation, URDF.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas (2015) es el avance tecnológico de los países en desarrollo. En este sentido, la robótica desempeña un papel crucial, promoviendo simultáneamente el desarrollo sostenible y el crecimiento económico. En su estudio, Almuaythir et al. (2024) menciona que, mediante la innovación y la automatización, esta disciplina impulsa la reducción de desigualdades y fomenta un crecimiento económico más equitativo.

Por su parte, Javaid et al. (2021) señala que, en el sector de la manufactura, un pilar de la Industria 4.0, la robótica optimiza la automatización al permitir la ejecución de tareas repetitivas con alta precisión, lo que resulta en productos de mayor calidad y entornos de trabajo más seguros.

En el ámbito educativo, Ali et al. (2023) afirma que la robótica enriquece el aprendizaje al fomentar una mayor participación del alumnado y cultivar habilidades esenciales como la resolución de problemas y el pensamiento crítico. De hecho Phokoye et al. (2024) indica que, a través de los programas universitarios de robótica, las instituciones pueden refinar sus metodologías de enseñanza y ofrecer una comprensión práctica de conceptos teóricos complejos.

Para Ouyang and Xu (2024), este enfoque es particularmente profundo en la educación en Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (STEM), donde las experiencias prácticas mejoran el rendimiento académico y perfeccionan las habilidades técnicas de los estudiantes.

Adicionalmente, Maritz et al. (2022) sostiene que estos programas estimulan la innovación y el emprendimiento en el ecosistema universitario. La integración de tecnologías de vanguardia es clave, ya que, según Huang et al. (2021), un enfoque interdisciplinario reduce la brecha entre la formación académica y las demandas de la industria.

Sin embargo, la implementación de laboratorios de robótica en universidades de países emergentes enfrenta obstáculos significativos, como limitaciones financieras, infraestructura inadecuada y escasez de personal capacitado. Las universidades públicas en México, por ejemplo, encaran dificultades para la adquisición y mantenimiento de equipos, lo que frena la investigación. La dependencia de tecnología importada genera altos costos, escasez de expertos locales y un riesgo de obsolescencia, provocando largos periodos de inactividad en los equipos.

Frente a este panorama, la simulación robótica de código abierto emerge como una solución clave. Cañas et al. (2020) presentan como ejemplo destacado la Robotics Academy, que integra el Sistema Operativo para Robots (ROS) y Gazebo para ofrecer ejercicios prácticos sin necesidad de equipos físicos costosos. De manera similar, Raudmäe et al. (2023) demuestran el potencial de estas soluciones con la plataforma Robotont, un robot móvil con

un gemelo digital diseñado para facilitar el aprendizaje con ROS.

Para niveles educativos básicos, Zhan et al. (2022) proponen IRobotQ3D, una plataforma para diseñar y programar robots en un entorno 3D, mientras que, en el ámbito de la investigación, Schegg et al. (2023) describen SofaGym, un software para simular robots blandos y entrenar algoritmos de Aprendizaje por Refuerzo.

De este modo, los simuladores de código abierto derriban las barreras económicas y facilitan la integración de la robótica en los planes de estudio. Al promover una experiencia de aprendizaje práctico, estas herramientas son esenciales para comprender conceptos complejos.

En este contexto, la principal contribución de este trabajo es proporcionar un marco de referencia completo, de código abierto y validado sistemáticamente para el modelado, simulación y análisis cinemático de un manipulador de Cuatro Grados de Libertad (4-GDL) en ROS 2. Este marco sirve como una herramienta educativa accessible, buscando superar las barreras de costo y equipamiento, y como una base sólida para futuras aplicaciones de control.

Para lograrlo, el presente artículo detalla sistemáticamente cada etapa del proceso: se comienza con la derivación de su modelo cinemático, abordando tanto la Cinemática Directa (CD) como la Inversa (CI); se implementan y evalúan diversos métodos numéricos para la resolución de la CI; se describe el proceso para traducir el modelo matemático a un Formato Universal de Descripción de Robots (URDF) para su validación en ROS 2 y finalmente, se presentan los resultados que comparan las soluciones analíticas, numéricas y la simulación, consolidando la validez del marco propuesto.

2. CINEMÁTICA DEL MANIPULADOR

El estudio del movimiento de un manipulador, o cinemática, es la base científica sobre la cual se construye todo el análisis, control y aplicación de los manipuladores. De acuerdo con Manseur and Doty (1988) la cinemática establece el análisis matemático preciso entre la configuración de las articulaciones del manipulador y la posición y orientación resultantes en su efector final. Este análisis se divide fundamentalmente en dos problemas, la CD y la CI. Según Malik et al. (2022), esta comprensión profunda, basada en un marco de modelado sistemático, es indispensable para el diseño, simulación y control de cualquier manipulador.

La CD es el proceso de determinar la posición y orientación (pose) cartesiana del efector final a partir de un conjunto conocido de variables articulares. Esto se puede expresar como una función f, mostrada en (1).

$$X = f(q) \tag{1}$$

Donde X es el vector de pose del efector final $[P_x, P_y, P_z, \phi, \theta, \psi]^T$ y q es el vector de variables articulares. El problema de la CD se considera sencillo porque para cualquier conjunto dado de ángulos articulares, existe una y solo una pose resultante del efector final. El mapeo es único y se puede calcular directamente a través de una serie de multiplicaciones de matrices, como se detalla más adelante.

La CI es el problema inverso y significativamente más desafiante, pues determina el conjunto requerido de variables articulares q que coloca el efector final en una pose cartesiana deseada X. Este mapeo inverso se expresa en (2) como:

$$q = f^{-1}(X) \tag{2}$$

Bao et al. (2017) afirma que la complejidad de la CI surge de varios factores. Entre estos, la inexistencia de soluciones, ya que si la pose deseada X está fuera del alcance físico del manipulador, no existe solución. De la misma forma, para una única pose deseada del efector final dentro del espacio de trabajo, puede haber múltiples soluciones, y a veces incluso infinitas.

Como menciona Mohammed and Sunar (2015), un manipulador planar simple a menudo puede alcanzar un punto con una postura de codo arriba o codo abajo, debido a esto, el sistema de control debe tener una base lógica para seleccionar una solución del conjunto de posibilidades. Otro factor a considerar es que las ecuaciones que gobiernan la CI son altamente no lineales y trigonométricas, lo que las hace difíciles de resolver. Aunque las soluciones analíticas, o de forma cerrada, son preferibles por su velocidad y completitud, solo existen para manipuladores con estructuras geométricas específicas. Para manipuladores más complejos, se deben emplear métodos numéricos iterativos.

Para realizar el análisis cinemático, se requiere un método consistente para describir la geometría del manipulador. La formulación de Denavit-Hartenberg (D-H) es el método mayormente adoptado para asignar sistemáticamente sistemas de coordenadas a los eslabones de un manipulador. Corke (2007) señala que su principal ventaja es que describe la relación espacial entre eslabones consecutivos utilizando un conjunto mínimo de cuatro parámetros, lo que simplifica enormemente el modelado matemático.

Estos cuatro parámetros D-H definen elegantemente la transformación del sistema $\{i-1\}$ al sistema $\{i\}$. Esta transformación, denotada por la matriz de transformación homogénea A_i, puede expresarse como un producto de cuatro rotaciones (Rot) y traslaciones (Trans) elementales, como se muestra en (3).

$$A_i = \mathrm{Rot}_{x,\theta_i}\mathrm{Trans}_{z,d_i}\mathrm{Trans}_{x,a_i}\mathrm{Rot}_{x,\alpha_i} \tag{3}$$

Esta secuencia corresponde a las siguientes operaciones para mover el sistema $\{i-1\}$ para que coincida con el sistema $\{i\}$:

(1) Rotar alrededor de z_{i-1} un ángulo θ_i.
(2) Trasladar a lo largo de z_{i-1} una distancia d_i.
(3) Trasladar a lo largo del nuevo eje x_i una distancia a_i.
(4) Rotar alrededor del nuevo eje x_i un ángulo α_i.

La transformación de la CD, que describe la pose del sistema del efector final $\{4\}$ con respecto al sistema base $\{0\}$, se encuentra multiplicando en serie las matrices de transformación de cada uno de los eslabones individuales, A_i. El orden de multiplicación es crítico y sigue la cadena

desde la base hasta el efector final, como se muestra en (4).

$$T_0^4 = A_1\left(q_0\right) A_2\left(q_1\right) A_3\left(q_2\right) A_4\left(q_3\right) \tag{4}$$

La matriz resultante, T_0^4, es una matriz de transformación homogénea de 4×4 que es una función de las cuatro variables articulares y toma la forma mostrada en (5).

$$T_0^4 = \begin{bmatrix} R & P \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

La submatriz superior izquierda de 3×3 es la matriz de rotación que describe la orientación del sistema del efector final en relación con el sistema base. El vector columna superior derecho de 3×1, P, da las coordenadas cartesianas (P_x, P_y, P_z) del origen del sistema del efector final con respecto al origen del sistema base. Extraer estos términos proporciona las ecuaciones finales de la CD.

Para proporcionar una derivación matemática concreta, se considera un manipulador de 4-GDL, con todas sus articulaciones del tipo rotacional. Este manipulador consta de una rotación de cintura (base), una articulación de hombro, una articulación de codo y una articulación en la muñeca del elemento terminal. Las cuatro articulaciones son rotacionales. Esta arquitectura es característica de muchos manipuladores educativos e industriales ligeros como el Dobot Magician, véase Tsai et al. (2021). Una característica clave de este diseño es que los ejes para las articulaciones de hombro, codo y muñeca (articulaciones 2, 3 y 4) son todos paralelos, lo que simplifica el análisis cinemático.

El primer paso para realizar la derivación matemática, es traducir la geometría física del manipulador a un formato matemático conciso creando una tabla de parámetros D-H. Esta tabla es el plano fundamental para todo el modelo cinemático.

Table 1. Parámetros D-H

i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$\pi/2$	d_1	q_0
2	a_2	0	0	q_1
3	a_3	0	0	q_2
4	a_4	0	0	q_3

La tabla 1 se construye con base a una geometría representativa mostrada en la Fig. 1, donde d_1 es la altura de la base, a_2 es la longitud del brazo superior (hombro a codo), a_3 es la longitud del antebrazo (codo a muñeca), y a_4 es la longitud desde la articulación de la muñeca hasta la punta del efector final. El ángulo de torsión $\alpha_1 = \pi/2$ rad es necesario para pasar del eje de rotación vertical de la cintura z_0 al eje de rotación horizontal del hombro z_1.

Sustituyendo los parámetros de la tabla 1 en (5) para cada eslabón, obtenemos las cuatro matrices de transformación individuales, mostradas en (6), (7), (8) y (9). Sean $c_i = \cos(\theta_i)$ y $s_i = \sin(\theta_i)$.

Para $j = 1$:

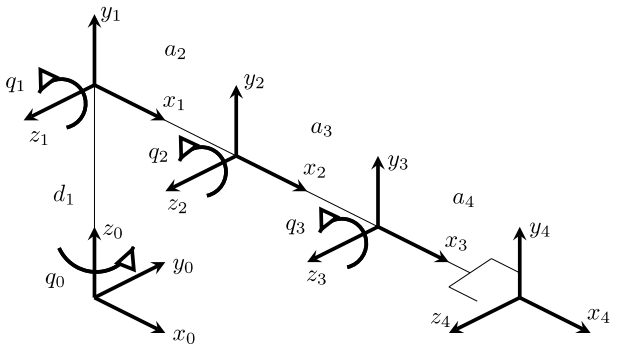


Fig. 1. Asignación de ejes para el manipulador

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

Para $j = 2$:

$$A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

Para $j = 3$:

$$A_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_3c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & a_3s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

Para $j = 4$:

$$A_4 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & a_4c_4 \\ s_4 & c_4 & 0 & a_4s_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

La matriz de transformación total T_0^4 es el producto de $A_1A_2A_3A_4$. La multiplicación se realiza secuencialmente. Primero, encontramos $T_0^2 = A_1A_2$, luego $T_0^3 = T_0^2A_3$, y finalmente $T_0^4 = T_0^3A_4$.

Sean $c_{23} = \cos(q_1 + q_2)$, $s_{23} = \sin(q_1 + q_2)$, $c_{234} = \cos(q_1 + q_2 + q_3)$, y $s_{234} = \sin(q_1 + q_2 + q_3)$.

Después de realizar la multiplicación simbólica de matrices, la matriz resultante T_0^4 es:

$$T_0^4 = \begin{bmatrix} c_1c_{234} & -c_1s_{234} & s_1 & c_1(a_2c_2 + a_3c_{23} + a_4c_{234}) \\ s_1c_{234} & -s_1s_{234} & -c_1 & s_1(a_2c_2 + a_3c_{23} + a_4c_{234}) \\ s_{234} & c_{234} & 0 & d_1 + a_2s_2 + a_3s_{23} + a_4s_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

De la última columna de la matriz mostrada en (10), se pueden extraer las ecuaciones de la CD para la posición del efector final (P_x, P_y, P_z):

$$\begin{aligned} P_x &= c_1(a_2c_2 + a_3c_{23} + a_4c_{234}) \\ P_y &= s_1(a_2c_2 + a_3c_{23} + a_4c_{234}) \\ P_z &= d_1 + a_2s_2 + a_3s_{23} + a_4s_{234} \end{aligned} \tag{11}$$

El conjunto de términos presentes en (11) proporcionan el mapeo directo y único desde cualquier conjunto dado de ángulos articulares (q_0, q_1, q_2, q_3) a la posición 3D resultante del efector final.

Un aspecto crítico para resolver la CI del manipulador de 4-GDL es reconocer que no puede alcanzar de forma independiente una pose arbitraria de 6-GDL (3 de posición, 3 de orientación). Un sistema con 6 restricciones y solo 4 variables controlables está sobredeterminado. Por lo tanto, cualquier problema de CI que pueda resolverse para este manipulador debe tener una restricción implícita. El problema se suele plantear en cómo encontrar los ángulos articulares para una posición 3D (P_x, P_y, P_z) teniendo como una única restricción la orientación. Para esta solución se pueden utilizar dos métodos analíticos principales, el enfoque geométrico y el enfoque algebraico.

El enfoque geométrico suele ser más intuitivo, ya que se basa en descomponer el problema espacial en una serie de problemas 2D más simples utilizando trigonometría. El ángulo de rotación de la base, q_0, determina el plano vertical en el que opera el resto del brazo. Proyectando el manipulador sobre el plano $x_0 - y_0$ de la base, q_0 se puede encontrar directamente a partir de las coordenadas deseadas del efector final (P_x, P_y), como se muestra en (12).

$$q_0 = \text{atan2}(P_y, P_x) \tag{12}$$

La función arcotangente de dos argumentos, atan2, se utiliza para determinar correctamente el cuadrante del ángulo y manejar el caso en que $P_x = 0$. También existe una segunda solución para q_0 que es $q_0' = q_0 + \pi$. Esto corresponde a una solución orientada hacia atrás, que puede requerir que las otras articulaciones se hiperextiendan y a menudo se descarta por ser poco práctica.

Con q_0 conocido, el problema 3D se reduce a un problema 2D dentro del plano vertical definido por q_0. Si se define un nuevo sistema de coordenadas dentro de este plano, la distancia horizontal desde el eje de la base hasta el efector final es $r = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$. La posición del centro de éste, (P_{ex}, P_{ez}), relativa al origen del sistema $\{1\}$ se da en (13).

$$\begin{aligned} P_{ex} &= r - a_4\cos(\phi) \\ P_{ez} &= P_z - d_1 - a_4\sin(\phi) \end{aligned} \tag{13}$$

Aquí, ϕ es el ángulo deseado del efector final con respecto a la horizontal, que es una entrada requerida para un problema completamente restringido. Ahora que se tiene un manipulador planar con dos articulaciones rotacionales que debe alcanzar el punto (P_{ex}, P_{ez}), la distancia al cuadrado desde el hombro hasta la muñeca es $D^2 = P_{ex}^2 + P_{ez}^2$. Aplicando la ley de los cosenos al triángulo formado por los eslabones a_2, a_3, y el segmento de línea D, se obtiene $D^2 = a_2^2 + a_3^2 - 2a_2a_3\cos(\pi - q_2)$. Dado que $\cos(\pi - q_2) = -\cos(q_2)$, esto se simplifica a:

$$\cos(q_2) = \frac{P_{ex}^2 + P_{ez}^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} \tag{14}$$

La ecuación (14) se puede resolver para q_2. Dado que $\cos(q_2) = \cos(-q_2)$, hay dos soluciones posibles para q_2, que corresponden a las configuraciones de codo arriba y codo abajo:

$$q_2 = \pm\text{acos}\left(\frac{P_{ex}^2 + P_{ez}^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3}\right) \tag{15}$$

Una vez que se conoce q_2, mostrada en (15) se puede encontrar q_1 utilizando identidades trigonométricas. Sea $\beta = \text{atan2}(P_{ez}, P_{ex})$ y sea γ el ángulo dentro del triángulo en la articulación del hombro, que se puede encontrar con otra aplicación de la ley de los cosenos, como se muestra en (16).

$$\cos(\gamma) = \frac{a_2^2 + D^2 - a_3^2}{2a_2D} \tag{16}$$

Entonces, q_1 es la suma o diferencia de estos ángulos, dependiendo de la configuración de codo elegida:

$$q_1 = \beta \mp \gamma \tag{17}$$

El signo presente en (17) depende de si se eligió la solución de codo arriba $(+q_2)$ o codo abajo $(-q_2)$. El ángulo articular final, q_3, se determina por la restricción de que la suma de los ángulos articulares, que debe ser igual al ángulo absoluto deseado ϕ, es decir $\phi = q_1 + q_2 + q_3$. Por lo tanto, q_3 se puede resolver directamente en (18).

$$q_3 = \phi - q_1 - q_2 \tag{18}$$

Este enfoque geométrico produce hasta dos soluciones distintas para el conjunto de ángulos articulares (q_0, q_1, q_2, q_3) para una pose alcanzable dada. El enfoque algebraico es más sistemático y se basa en la manipulación de las ecuaciones matriciales de la CD. El objetivo es aislar las variables articulares una por una. El proceso comienza con (19), donde se conoce la pose deseada del efector final T_{obj}:

$$T_0^4 = T_{obj} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & P_x \\ n_y & s_y & a_y & P_y \\ n_z & s_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{19}$$

Aquí se puede premultiplicar ambos lados por la inversa de la primera matriz de transformación, A_1^{-1} y se obtiene (20).

$$\begin{aligned} A_1^{-1}T_0^4 &= A_2A_3A_4 \\ A_1^{-1}T_{obj} &= A_2A_3A_4 \end{aligned} \tag{20}$$

La matriz A_1^{-1} es fácil de calcular. El producto del lado derecho, $A_2A_3A_4$, da como resultado una matriz cuyos elementos son funciones de q_1, q_2, q_3. La matriz del lado izquierdo, $A_1^{-1}T_{obj}$, tiene elementos que son funciones de q_0 y los componentes conocidos de la pose objetivo.

Al igualar los elementos correspondientes de las matrices en ambos lados de la ecuación, se genera un sistema de doce ecuaciones escalares. Estas ecuaciones pueden resolverse sistemáticamente. Por ejemplo en (21), igualando los elementos $(1,4)$ y $(2,4)$ se obtiene:

$$\begin{aligned} P_x c_1 + P_y s_1 &= a_2 c_2 + a_3 c_{23} + a_4 c_{234} \\ P_z - d_1 &= a_2 s_2 + a_3 s_{23} + a_4 s_{234} \end{aligned} \tag{21}$$

Este método algebraico, aunque menos intuitivo, es más riguroso y menos propenso a descuidos geométricos, conduce al mismo conjunto de soluciones que el enfoque geométrico, confirmando los resultados a través de una vía matemática diferente. La derivación completa implica un uso extensivo de identidades trigonométricas para aislar los ángulos articulares desconocidos.

3. MÉTODOS NUMÉRICOS

Los métodos numéricos iterativos constituyen un método generalizable para la solución del problema de la CI. Para la evaluación computacional en este estudio se implementaron los algoritmos de Newton-Raphson (NR), Gauss-Newton (GN) y Levenberg-Marquardt (LM). Tanto el método de NR, que aborda el problema como la búsqueda de raíces, como el de GN, que lo reformula como una optimización por mínimos cuadrados, dependen de la matriz Jacobiana; para ambos, se evaluaron variantes que emplean la pseudoinversa para mejorar la robustez ante singularidades (pse=1) y otras que utilizan una inversión matricial estándar (pse=0).

Por su parte, el algoritmo de LM es un método híbrido que interpola su solución entre los métodos de GN y el del gradiente descendiente, mediante un parámetro de amortiguamiento. Se investigan tres estrategias heurísticas para la actualización de este parámetro (LMW, LMC y LMS) y para cada una se prueban diferentes valores iniciales (1e-6, 1e-4, 0.001, 0.1 y 1.0) que definen el comportamiento de arranque del algoritmo. Las soluciones se obtuvieron usando las librerías de Python para robótica de Peter Corke, descritos en el trabajo de Haviland and Corke (2024).

A partir de una estimación inicial de la configuración articular, éstas se refinan de forma iterativa desde una suposición para minimizar el error entre la posición actual y la deseada del efector final. La principal ventaja de usar estos métodos numéricos es la versatilidad, pues se pueden aplicar a prácticamente cualquier configuración robótica, incluidos los manipuladores redundantes, sin necesidad de una derivación personalizada. Sin embargo, esta generalidad conlleva varios inconvenientes bien documentados.

El proceso iterativo puede ser computacionalmente más exigente que un cálculo analítico directo, lo que puede afectar el desempeño en tiempo real. Además, la convergencia a una solución válida no siempre está garantizada y puede ser muy sensible a la calidad de la estimación inicial. Estos métodos también enfrentan desafíos cerca de singularidades en algunas configuraciones del manipulador, en las que éste pierde uno o más GDL. Esta disyuntiva fundamental entre robustez y exactitud es una consideración clave al evaluar solucionadores numéricos.

4. MODELO URDF

El formato URDF es una especificación basada en XML para modelar las características físicas de cualquier robot. Según Open-Robotics (2025), sirve como un lenguaje común para varios componentes de ROS 2, permitiéndoles comprender la estructura del robot para tareas que van desde la visualización hasta la simulación basada en modelos físicos y la planificación de trayectorias.

Elwin (2025) menciona que la estructura fundamental de un URDF es un árbol cinemático compuesto por dos tipos de elementos primarios: `<link>` y `<joint>`. La traducción de un modelo cinemático D-H a un modelo URDF presenta un desafío conceptual debido a las diferencias fundamentales en sus paradigmas de representación. La convención D-H es una notación matemática minimalista y altamente optimizada que describe la transformación espacial entre los ejes de articulaciones consecutivas utilizando un conjunto mínimo de cuatro parámetros a_i, α_i, d_i y θ_i.

Además, su formulación es inherentemente algorítmica y está diseñada para la multiplicación secuencial de matrices en el cálculo de la CD. Por el contrario, URDF es un formato declarativo que describe una estructura de grafo de escena o árbol, ya que define la pose estática del sistema de coordenadas de un eslabón hijo con respecto al sistema de coordenadas de su eslabón padre a través de una etiqueta `<origin>`, a la cual se le aplica el movimiento de una articulación de un solo eje, como lo demuestra Huczala et al. (2022).

Para superar esta disparidad y garantizar una fidelidad cinemática absoluta, se adopta una metodología que descompone la transformación D-H en sus operaciones elementales y las replica explícitamente en la estructura URDF. La matriz de transformación homogénea estándar de D-H, A_i, que mapea el sistema de coordenadas $\{i-1\}$ al sistema $\{i\}$, es el producto de cuatro transformaciones elementales, como se describe en la ecuación (3).

El modelo URDF se construye a partir de los parámetros D-H especificados en la tabla 1. El modelo se implementa en un archivo `.xacro`, que permite expresar macros y propiedades para aprovechar la parametrización del manipulador. Las constantes geométricas del manipulador d_1, a_2, a_3 y a_4 se definen como propiedades de `xacro`, lo que permite una fácil modificación y asegura una consistencia total con el modelo analítico.

La cadena cinemática se construye secuencialmente, comenzando desde un eslabón base estático (`base_link`), que ancla el manipulador al mundo. A continuación, se detalla la implementación para cada articulación:

- Articulación 1:
  (1) Se define una articulación `revolute` llamada `joint_q0` que conecta `base_link` a `link_1`. Esta articulación implementa la rotación variable q_0 alrededor del eje z_0.
  (2) Se define el eslabón `link_1`, que es el primer eslabón físico, con dimensión d_1 y torsión α_1 que es crucial para cambiar del eje de rotación vertical de la cintura (z_0) al eje de rotación horizontal del hombro (z_1). La etiqueta `<origin xyz="0`

`0 ${d_1}" rpy="${pi/2} 0 0"/>` codifica estos parámetros.

- Articulación 2:
  (1) Una articulación `revolute` llamada `joint_q1` conecta `link_1` a `link_2`, implementando la rotación q_1.
  (2) El eslabón `link_2` implementa una traslación en el eje x_1 y corresponde a la longitud a_2 del eslabón. Su etiqueta es: `<origin xyz="${a_2} 0 0" rpy="0 0 0"/>`. El `rpy` nulo refleja que $\alpha_2 = 0$.
- Articulación 3:
  (1) La articulación `revolute` con nombre `joint_q2` conecta `link_2` a `link_3`, implementando la rotación q_2.
  (2) El eslabón `link_3` tienen una etiqueta `<origin xyz="${a_3} 0 0" rpy="0 0 0"/>`, correspondiente a la longitud a_3 y al ángulo de torsión $\alpha_3 = 0$.
- Articulación 4:
  (1) Finalmente, una articulación `revolute joint_q3` conecta `link_3` a `link_4`, implementando la rotación q_3.
  (2) El eslabón `link_4` soporta el efector final del manipulador `ejes_link4`. Su etiqueta es: `<origin xyz="${a_4} 0 0" rpy="0 0 0"/>`, similar al eslabón `link_3`.

Para la verificación del modelo, se utiliza un archivo de lanzamiento de ROS 2 que inicia tres nodos esenciales: `robot_state_publisher` que lee el archivo URDF y escucha los estados de las articulaciones del tópico `joint_states` y publica las transformaciones (`tf2`) de la CD del manipulador, `joint_state_publisher_gui` que proporciona una interfaz gráfica de usuario con deslizadores para controlar interactivamente los valores de cada articulación variable (q_0, q_1, q_2, q_3) y publica estos valores en el tópico `joint_states` y `rviz2` que es la herramienta de visualización 3D de ROS2, configurada para mostrar el modelo del manipulador `RobotModel` y el árbol de transformadas (`TF`).

Este conjunto permite una validación visual e interactiva en el visualizador RVIZ 2, que es una herramienta de visualización 3D estándar dentro del ecosistema ROS 2, diseñada para mostrar datos del manipulador, información de sensores y estados de depuración. Al ajustar los controles en la interfaz gráfica (GUI), se puede observar la pose del manipulador renderizado en RVIZ 2 en tiempo real. Este proceso proporciona una confirmación intuitiva y potente de que la cadena cinemática se ha ensamblado correctamente, que los ejes de rotación son los correctos y que las geometrías de los eslabones están posicionadas y orientadas según lo previsto por el modelo D-H.

Para una validación cuantitativa, se puede consultar la pose del efector final desde el árbol de transformadas `tf2` para un conjunto dado de ángulos articulares y comparar los resultados numéricos con los valores predichos por la ecuación (11), confirmando así la equivalencia entre el modelo teórico y su implementación en simulación, como se aprecia en la Fig. 2.

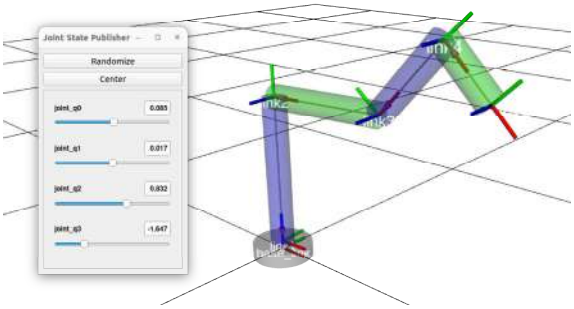


Fig. 2. Validación interactiva del manipulador. La GUI (izquierda) permite manipular los valores articulares, y la ventana principal (derecha) muestra la postura resultante en RVIZ 2.

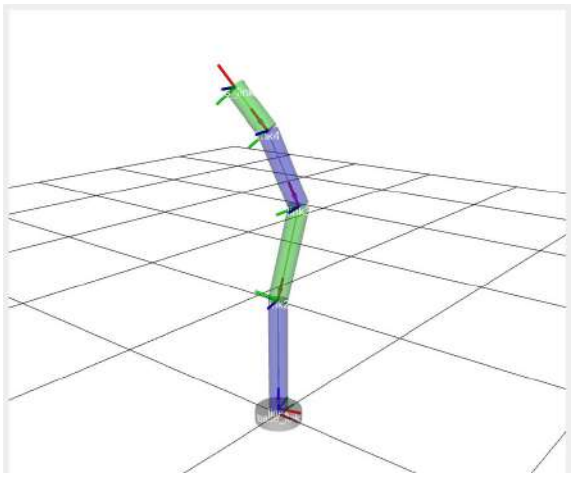


Fig. 3. Pose 1 del manipulador.

5. RESULTADOS

Para las poses $[P_x, P_y, P_z, \phi, \theta, \psi]$, mostradas en la tabla 2, se da solución a la CI del manipulador, a través de los métodos descritos anteriormente.

Table 2. Diferentes poses a resolver

Pose	P_x (m)	P_y (m)	P_z (m)	ϕ (rad)	θ (rad)	ψ (rad)
1	-0.0789	-0.025	1.051	-1.57074	-0.86178	-2.83511
2	0.227	-0.118	0.853	-1.57080	-0.15552	2.66171
3	-0.333	0.077	0.573	1.57039	-1.28213	2.91350

Table 3. Soluciones a la pose 1

Método	q_0 (rad)	q_1 (rad)	q_2 (rad)	q_3 (rad)
Analítico	0.3067	1.352	0.6457	0.282
NR pse=0	0.3067	-4.418	-0.6478	-5.221
GN pse=0	0.3067	-4.419	-0.6464	-5.221
NR pse=1	0.3067	1.346	0.6605	0.2737
GN pse=1	0.3067	1.352	0.646	0.2818
LMW 1e-4	0.3067	1.869	-0.6589	-5.214
LMW 1e-6	0.3067	1.865	-6.931	1.062
LMC 1.0	0.3067	-4.934	0.6516	0.2785
LMC 0.1	0.3067	1.351	0.6479	0.2807
LMS 0.001	0.3067	1.87	-0.6602	1.07
LMS 0.0001	0.3067	1.349	0.6531	0.2776

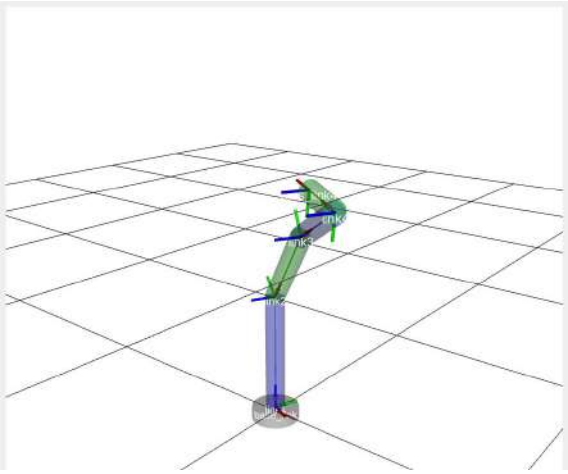


Fig. 4. Pose 2 del manipulador.

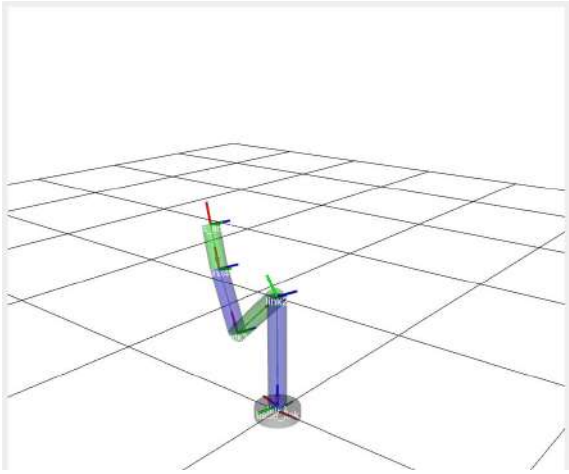


Fig. 5. Pose 3 del manipulador.

Para la pose 1, definida por las coordenadas y la orientación del efector final, la solución analítica de referencia se calculó como $q_0 = 0.3067$ rad, $q_1 = 1.352$ rad, $q_2 = 0.6457$ rad y $q_3 = 0.282$ rad. Como se observa en la tabla 3, varios de los métodos numéricos, como el de Gauss-Newton (GN pse=1) y el Levenberg-Marquardt (LMS 0.0001), convergieron a valores prácticamente idénticos a la solución analítica, validando su efectividad. Es importante destacar que otros métodos convergieron a una segunda solución válida, lo que demuestra la existencia de múltiples configuraciones para alcanzar una misma pose, un comportamiento característico en la cinemática inversa. La representación visual del manipulador en esta configuración se muestra en la Fig. 3.

La solución analítica para la pose 2 es $q_0 = -0.4797$, $q_1 = 0.9167$, $q_2 = -0.3922$ y $q_3 = 2.462$ rad. Los resultados, presentados en la tabla 4, muestran nuevamente una alta correspondencia entre la solución analítica y las obtenidas por métodos numéricos como Gauss-Newton (GN pse=0) y Levenberg-Marquardt (LMW 1e-6). Esto confirma la capacidad de los algoritmos para resolver la cinemática en diferentes regiones del espacio de trabajo. La Fig. 4 ilustra al manipulador alcanzando esta pose de manera satisfactoria.

Table 4. Soluciones a la pose 2

Método	q_0 (rad)	q_1 (rad)	q_2 (rad)	q_3 (rad)
Analítico	-0.4797	0.9167	-0.3922	2.462
NR pse=0	-0.4797	0.5936	-5.866	1.975
GN pse=0	-0.4797	0.9232	-0.4082	2.471
NR pse=1	-0.4797	-5.682	-5.884	1.986
GN pse=1	-0.4797	-5.688	0.4133	-4.306
LMW 1e-4	-0.4797	0.6025	-5.888	1.988
LMW 1e-6	-0.4797	0.9207	-0.4022	2.468
LMC 1.0	-0.4797	0.9172	-0.3935	-3.821
LMC 0.1	-0.4797	-5.366	-0.3934	2.462
LMS 0.001	-0.4797	-5.359	-0.4115	-3.81
LMS 0.0001	-0.4797	0.9188	-0.3975	-3.818

Table 5. Soluciones a la pose 3

Método	q_0 (rad)	q_1 (rad)	q_2 (rad)	q_3 (rad)
Analítico	2.913	-0.7324	1.833	0.1816
NR pse=0	-3.37	-0.7327	-4.447	0.1787
GN pse=0	-3.37	-0.7321	1.834	0.1801
NR pse=1	2.913	-5.689	-1.835	-3.761
GN pse=1	2.913	-0.734	-4.449	0.182
LMW 1e-4	-3.37	0.5909	-8.117	2.525
LMW 1e-6	-3.37	-7.016	-4.45	0.1816
LMC 1.0	2.913	-5.693	-1.833	-3.759
LMC 0.1	2.913	0.5905	-1.833	2.525
LMS 0.001	-3.37	-0.7332	-4.447	0.1793
LMS 0.0001	2.913	-0.7329	1.834	0.181

Finalmente para la pose 3, el método analítico arrojó la solución $q_0 = 2.913$, $q_1 = -0.7324$, $q_2 = 1.833$ y $q_3 = 0.1816$ rad. La tabla 5 muestra que los métodos numéricos también lograron converger a soluciones precisas. En particular, el método de Gauss-Newton (GN pse=1) y el Levenberg-Marquardt (LMS 0.0001) alcanzaron esta solución con un error mínimo. Otros métodos, en cambio, encontraron una solución alternativa con un ángulo base de $q_0 \approx -3.37$ rad, lo que refuerza la existencia de múltiples soluciones. La Fig. 5 presenta la visualización del manipulador en esta tercera configuración, corroborando la validez de los cálculos cinemáticos.

La validación cruzada entre los resultados del modelo analítico, las soluciones de los algoritmos numéricos y la inspección visual en RVIZ 2 confirma la correcta derivación de la CD y CI, así como la fiel implementación del modelo URDF del manipulador.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado con éxito el desarrollo completo, la derivación matemática y la validación de un manipulador de 4-GDL. Se ha demostrado la correcta implementación del modelo cinemático, corroborando la equivalencia entre las soluciones analíticas, los resultados de diversos métodos numéricos y la representación visual en la simulación desarrollada en ROS 2. La validación cruzada confirma que tanto el modelo teórico como su implementación URDF son precisos y fiables, proporcionando una base sólida para aplicaciones más complejas.

Aunque los métodos cinemáticos empleados son clásicos en la literatura, la contribución de este trabajo radica en la integración completa y validación cruzada de estos métodos en la plataforma moderna ROS 2. Este marco reproducible

sirve como un recurso educativo crucial y un punto de partida verificado p ara e l d esarrollo d e a plicaciones más avanzadas.

Como trabajo futuro, se planea extender el alcance de este proyecto más allá del análisis cinemático. La próxima fase de la investigación se centrará en la simulación dinámica del manipulador. Para ello, se integrará el modelo URDF con el simulador Gazebo, lo que permitirá incorporar efectos físicos como la gravedad, inercias y colisiones. Esta simulación de alta fidelidad s erá f undamental p ara e l diseño y prueba de algoritmos de control avanzados, así como para la planificación d e t rayectorias e n e ntornos realistas, acercando aún más el modelo virtual al comportamiento de un prototipo físico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) de México por el invaluable apoyo proporcionado para la realización de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

Ali, N., Santos, I.M., AlHakmani, R., Khurma, O.A., Khine, M.S., and Kassem, U. (2023). Exploring technology acceptance: Teachers' perspectives on robotics in teaching and learning in the uae. *Contemporary Educational Technology*, 15(4), ep469.

Almuaythir, S., Singh, A.K., Alhusban, M., and Daoud, A.O. (2024). Robotics technology: catalyst for sustainable development—impact on innovation, healthcare, inequality, and economic growth. *Discover Sustainability*, 5(1), 486.

Bao, G., Liu, S., and Zhao, H. (2017). Kinematics simulation of 4 dof manipulator. In *Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Materials Science, Machinery and Energy Engineering (MSMEE 2017)*, 400–408. Atlantis Press. doi:10.2991/msmee-17.2017.81. URL `https://doi.org/10.2991/msmee-17.2017.81`.

Cañas, J.M., Perdices, E., García-Pérez, L., and Fernández-Conde, J. (2020). A ros-based open tool for intelligent robotics education. *Applied Sciences*, 10(21), 7419.

Corke, P.I. (2007). A simple and systematic approach to assigning denavit–hartenberg parameters. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(3), 590–594. doi: 10.1109/TRO.2007.896765.

Elwin, M. (2025). Robot Modeling — nu-msr.github.io. [Accessed 08-10-2025].

Haviland, J. and Corke, P. (2024). Manipulator differential kinematics: Part i: Kinematics, velocity, and applications [tutorial]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 31(4), 149–158. doi:10.1109/MRA.2023.3270228.

Huang, Z., Kougianos, E., Ge, X., Wang, S., Chen, P.D., and Cai, L. (2021). A systematic interdisciplinary engineering and technology model using cutting-edge technologies for stem education. *IEEE Transactions on Education*, 64(4), 390–397.

Huczala, D., Kot, T., Mlotek, J., Suder, J., and Pfurner, M. (2022). An automated conversion between selected robot kinematic representations. In *2022 10th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA)*, 47–52. IEEE. doi: 10.1109/iccma56665.2022.10011595.

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P., and Suman, R. (2021). Substantial capabilities of robotics in enhancing industry 4.0 implementation. *Cognitive Robotics*, 1, 58–75.

Malik, A., Lischuk, Y., Henderson, T., and Prazenica, R. (2022). A deep reinforcement-learning approach for inverse kinematics solution of a high degree of freedom robotic manipulator. *Robotics*, 11(2). doi:10.3390/robotics11020044. URL `https://www.mdpi.com/2218-6581/11/2/44`.

Manseur, R. and Doty, K.L. (1988). A fast algorithm for inverse kinematic analysis of robot manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 7(3), 52–63. doi:10.1177/027836498800700304. URL `https://doi.org/10.1177/027836498800700304`.

Maritz, A., Nguyen, Q., and Ivanov, S. (2022). Student entrepreneurship ecosystems at australian higher education institutions. *Journal of Small Business and Enterprise Development*, 29(6), 940–957.

Mohammed, A.A. and Sunar, M. (2015). Kinematics modeling of a 4-dof robotic arm. In *2015 International Conference on Control, Automation and Robotics*, 87–91. doi:10.1109/ICCAR.2015.7166008.

Open-Robotics (2025). Urdf.

Ouyang, F. and Xu, W. (2024). The effects of educational robotics in stem education: A multilevel meta-analysis. *International Journal of STEM education*, 11(1), 7.

Phokoye, S.P., Epizitone, A., Nkomo, N., Mthalane, P.P., Moyane, S.P., Khumalo, M.M., Luthuli, M., and Zondi, N.P. (2024). Exploring the adoption of robotics in teaching and learning in higher education institutions. In *Informatics*, volume 11, 91. MDPI.

Raudmäe, R., Schumann, S., Vunder, V., Oidekivi, M., Nigol, M.K., Valner, R., Masnavi, H., Singh, A.K., Aabloo, A., and Kruusamäe, K. (2023). Robotont–open-source and ros-supported omnidirectional mobile robot for education and research. *HardwareX*, 14, e00436.

Schegg, P., Ménager, E., Khairallah, E., Marchal, D., Dequidt, J., Preux, P., and Duriez, C. (2023). Sofagym: An open platform for reinforcement learning based on soft robot simulations. *Soft Robotics*, 10(2), 410–430.

Tsai, P.S., Wu, T.F., Chen, J.Y., and Lee, F.H. (2021). Drawing system with dobot magician manipulator based on image processing. *Machines*, 9(12), 302.

Unidas, N. (2015). Objetivos de desarrollo sostenible. *Naciones Unidas. Recuperado de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible*.

Zhan, Z., Zhong, B., Shi, X., Si, Q., and Zheng, J. (2022). The design and application of irobotq3d for simulating robotics experiments in k-12 education. *Computer applications in engineering education*, 30(2), 532–549.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Stress and Strain Analyzer to Improve the Teaching-Learning Process of Mechatronics Engineering

Luis Manuel García Martínez* Javier Uriarte Flores* Pedro Iván Clemente Salazar**

** Tecnológico Nacional de México / ITS Teziutlán / CA Mecatrónica Inteligente y sus Aplicaciones. Fracción l y ll S/N, Aire Libre, Teziutlán, Puebla. 73960. (Tel: 231 311 4000; e-mail: luis.gm@teziutlan.tecnm.mx, javier.uf@teziutlan.tecnm.mx)*

*** Tecnológico Nacional de México / ITS Teziutlán/ Ingeniería Mecatrónica. Fracción l y ll S/N, Aire Libre, Teziutlán, Puebla. 73960 (Tel: 231 311 4000; e-mail: L20TE0565@teziutlan.tecnm.mx)*

Abstract: This project exposes the design process of a mechatronic system to measure and analyze tension and deformation in a mechanical structure based on the use and application of strain gauges. This system proposes an educational tool that integrates diverse instrumentation solutions, with the aim of improving the engineering teaching-learning process, taking as its focus the adequate understanding of topics related to mechanics and particularly, with those phenomena defined within the domain of statics, material resistance and mechanical vibrations. The methodology is structured in six phases: design of the structure, materialization of models from additive manufacturing, construction of the physical model, instrumentation of the system, calibration of the deformation sensors and the creation of the graphic interface. As part of the results obtained from the tests carried out, it is possible to demonstrate that the system establishes a linear correlation between the voltage variations in the sensors and the weight variations supported by the armature. Situation that evidences a linear behavior of the material and the geometry obtained. Thus, this proposal opens the door to future research that will allow the integration of emerging technologies in the development of systems to support the training process of engineering.

Keywords: Mechanics, Structural Design, Stress, Strain, Measurement.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la enseñanza de la ingeniería mecánica aborda dificultades importantes que se relacionan con la comprensión y aplicación de conceptos. Comúnmente, los estudiantes aprenden mediante memorización, resolución de ejercicios y aunque cada vez es más común el uso de simuladores, pocas veces los estudiantes tienen la oportunidad de practicar con herramientas donde puedan visualizar de manera real los fenómenos que se describen en las clases.

Los diferentes contextos y el nivel de dominio de competencias digitales tanto de los estudiantes como de los profesores, hizo concebir que los estudiantes pueden aprender mejor mediante la experiencia concreta, la observación reflexiva, la conceptualización abstracta y la experimentación activa. (Kolb, 1984)

Mediante la práctica y el contacto directo con el fenómeno analizado, se promueve la capacidad de llevar los conocimientos teóricos a la práctica, favoreciendo el aprendizaje profundo. (Béjar, 2014) Bajo estas circunstancias, el presente proyecto busca desarrollar una solución innovadora mediante el desarrollo de un sistema interactivo que pueda analizar esfuerzos y deformaciones de elementos de un sistema mecánico a través de sensores y una interfaz gráfica.

Actualmente, los sistemas educativos de apoyo son de alto costo, difíciles de encontrar y para muchos contextos, difíciles de obtener. Esto limita la capacidad que tienen los estudiantes de aprender. Con la elaboración de este sistema mecatrónico, se pretende un menor costo de desarrollo, comparado con los existentes. Así, se busca asegurar el correcto funcionamiento del sensor para la adquisición precisa de datos, integrando una interfaz de usuario que represente el comportamiento dinámico del sistema mecánico.

Entre los beneficios de la propuesta se contempla para los estudiantes una forma innovadora de analizar temas complejos, donde mediante la experimentación puedan observar fenómenos producidos por cargas estáticas, los cuales, pueden explicarse mediante modelos matemáticos para el cálculo de deflexiones, torsión y flexión. Al realizar experimentación, se busca promover el desarrollo de habilidades blandas como son: la participación, la comunicación y el trabajo colaborativo. (García-Bullé, 2021)

Para los profesores, se busca ofrecer una herramienta de apoyo que permita acercar el conocimiento de manera más lúdica con el fin de promover la curiosidad, misma que tiene una gran importancia en el proceso de aprendizaje (Vargas-Murillo, 2020). El desarrollo tecnológico permite el uso de las TICs en el ámbito educativo, surgiendo así la Tecnología Educativa. Su incorporación mejora la eficiencia del proceso enseñanza aprendizaje, sin dejar de lado que debe existir además una mejora en la estructura organizativa y en la formación docente. (Pérez, 2022)

El principal objetivo de este proyecto es instrumentar un sistema mecánico de apoyo al proceso enseñanza aprendizaje, aplicando manufactura aditiva y técnicas de simulación.

Así, este sistema de apoyo busca un acercamiento de los estudiantes al conocimiento, aunado a una adecuada planeación didáctica, que incluya el desarrollo de prácticas que cultiven, además, habilidades blandas. En conjunto, se busca cultivar la innovación dentro del proceso enseñanza aprendizaje de la ingeniería, haciéndolo interactivo, participativo y centrado en el estudiante.

2. METODOLOGÍA

Como primera etapa se realiza una investigación para identificar las fases del proceso enseñanza aprendizaje de las ciencias en la Educación Superior Tecnológica, posteriormente, se analiza la incidencia y aplicación sobre las opciones tecnológicas que actualmente se encuentran en el mercado para contribuir a la enseñanza de las ciencias. (Serna, 2021)

Con la información recabada, se obtienen datos para desarrollar la ingeniería de concepto de un nuevo sistema, aplicando la metodología lineal de diseño, como parte de un proceso iterativo. (Martínez, 2024) Se desarrolla la ingeniería básica y de detalle del sistema mecánico propuesto y se seleccionan los equipos, dispositivos y elementos comerciales necesarios para la construcción del prototipo.

2.1 Análisis de Modelos

Como primer paso, se realizó el modelado analítico para determinar los valores geométricos de los componentes y al mismo tiempo, determinar el rango de valores de los resultados esperados en la práctica, tanto de deformación, como de tensión. Se propone como carga de trabajo un valor máximo Q= 2.5 kg, con un factor de diseño: $n_d = 2$, lo que otorga un valor de carga de diseño $P_d = 5$ kg, o bien, $P_d = 49$ N, aplicado en el nodo central en el modelo de armadura que se muestra en la figura 1.

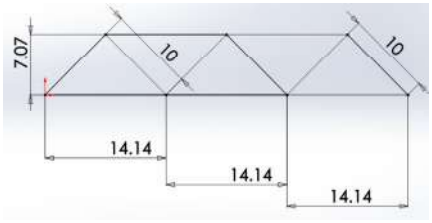


Figura 1. Modelo de Armadura Tipo Warren.

Se obtuvieron las distribuciones de tensiones que muestran en la figura 2. De este modo, considerando la mayor carga axial y aplicando un factor de diseño $n_d = 1.5$ para la carga, se propuso una sección transversal para el grupo de elementos que conformen el dispositivo. Se busca que además de resistir la tensión, esta sección fuera capaz de unirse entre sí con ayuda de pernos de conexión.

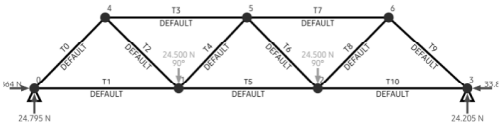


Figura 2. Modelo de Armadura Tipo Warren.
Tensiones máximas: $T_3 = T_7 = 51$ N (C)

2.2 Establecimiento de Geometrías

Para el diseño ante tensión, se utiliza como carga de diseño Q_d= 73.5 N, con el cual se propone un diseño de sección transversal basado en un perfil IPE, debido a su alta inercia, propia de su alma central y alas paralelas, así como su relativa facilidad de construcción mediante manufactura aditiva.

Se proponen valores de espesor de alma y de ancho de base, posteriormente se aplica el método determinista para hallar la altura del patín y de la sección, considerando un factor de seguridad n= 3. Para establecer las propiedades de manufactura del PLA (Leyton, 2019) se capturaron las características de resistencia ante fluencia, módulo de elasticidad y esfuerzo último en el software, dando como resultado las propiedades de sección mostradas en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de la Sección Transversal

Figura	Área (mm^2)	Inercia (mm^4)
Sección 1	40.5	44.61

El material para utilizar es PLA, debido a su relativo bajo costo y características de resistencia. Se determinó un relleno de 40% en la manufactura de los elementos para no disminuir abruptamente la resistencia en las piezas. Para simplificar el modelo realizado en SolidWorks, se proyectó como un elemento hueco, donde la cantidad de material correspondiente al relleno se distribuyó uniformemente desde el interior de las paredes hacia el centro del elemento, tal como se observa en la figura 3.

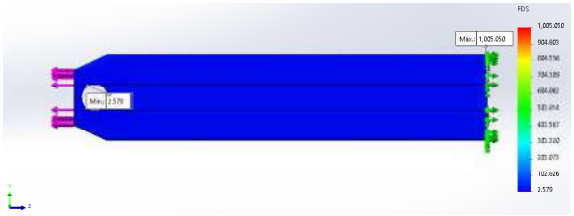


Figura 3. Distribución del factor de seguridad para la geometría definida.

En las pruebas de tensión realizadas al modelo virtual, se observa que el factor de seguridad mínimo es n= 2.57, pese a ser menor que el propuesto (n= 3) se dice que la geometría es

aceptable, ya que los esfuerzos resultantes son permisibles para la aplicación.

Para la manufactura, se usó el diseño de dos vigas de diferentes longitudes y el diseño de una unión que facilite la creación de las armaduras y del modelo final, como se observa en las figuras 4 y 5.

Figura 4. Modelos para manufactura aditiva.

Figura 5. Modelo de Armadura tipo Warren elaborado en SolidWorks.

2.3 Parámetros de Manufactura

Se realizaron las primeras pruebas de manufactura aditiva del modelo siguiendo los parámetros descritos en el software, sin embargo, se observó que los modelos resultantes fueron demasiado rígidos para lograr lecturas en las galgas, por lo que se modificaron los parámetros básicos de impresión, que se muestran en la tabla 2; así como los parámetros avanzados que se observan en la tabla 3.

Tabla 2. Configuraciones básicas para la manufactura.

Tipo de configuración	Configuración	Parámetro
Calidad	Espesor de la capa (mm)	0.2
	Espesor de la pared (mm)	0.8
	Habilitar retracción	Sí
Relleno	Espesor superior e inferior (mm)	0.8
	Densidad del relleno (%)	30
Velocidad	Velocidad de impresión (mm/s)	100
	Temperatura de impresión (°C)	185
	Temperatura de la cama (°C)	50
Soportes	Tipo de soporte	En cualquier sitio
	Tipo de adhesión en la cama	Borde (Brim)
Filamento	Diámetro (mm)	1.75
	Flujo (%)	100
Máquina	Tamaño de la boquilla (mm)	0.4

Tabla 3. Configuraciones avanzadas para la manufactura.

Tipo de configuración	Configuración	Parámetro
Retracción	Velocidad (mm/s)	80
	Distancia (mm)	6.0
Calidad	Espesor de capa inicial (mm)	0.3
	Ancho de línea de la capa (mm)	100
	Cortar fondo del objeto (mm)	0.0
	Superposición de la extrusión dual	0.15
Velocidad	Velocidad desplazamientos (mm/s)	80
	Velocidad capa inferior (mm/s)	20
	Velocidad de relleno (mm/s)	0.0
	Velocidad de capa superior e inferior (mm/s)	80
	Velocidad del borde externa (mm/s)	35
	Velocidad relleno interno (mm/s)	35
Ventilación	Mínimo tiempo por capa	3
	Habilitar ventilación	Sí

Para la obtención de los modelos por manufactura aditiva, específicamente en equipos que trabajan con filamento extruido, es fundamental elegir la posición de impresión, pues la unión de las líneas puede generar separaciones debido a esfuerzos cortantes. Así las piezas que se someten a tensión axial se imprimen de forma horizontal y aquellas que se someterán a tensión transversal, se imprimen de forma vertical. Tal como se observa en la figura 6.

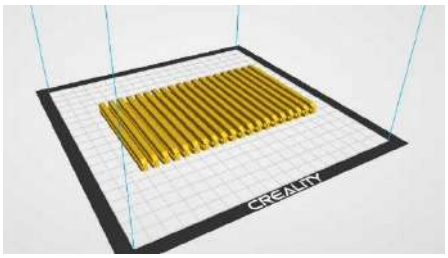


Figura 6. Manufactura del modelo por impresión 3D.

2.4 Construcción del Modelo

Para la construcción del modelo se usaron tornillos de 1/8" para evitar movimientos excesivos al realizar las pruebas. Como primer paso, se ensamblaron ambas armaduras que forman parte del modelo 3D, dando como resultado el prototipo que se muestra en la figura 7.

Figura 7. Modelo final ensamblado.

Una vez que el modelo ha sido construido, se implementan los sensores de medición, los cuales son galgas extensométricas del modelo BF350-3AA, que consta de los parámetros observados en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros del sensor.

Parámetros de la galga extensiométrica BF350 – 3AA	
Valor de resistencia (Ω)	350
Resistencia de aislamiento (Ω)	10000
Factor de la galga	2.0
Temperatura de trabajo	-30 °C + 80 °C
Dimensiones	7.1 mm x 4.0 mm
Material base	Epoxy-modified phenolic

La estructura de la galga consiste en un alambre o placa delgada metálica que se adhiere a la superficie o estructura que se desee medir. (Idrovo & Quintanilla, 2010) Cuando la estructura en la que se encuentre la galga se empieza a deformar a compresión o tracción, la galga se estira o comprime provocando un cambio en la resistencia eléctrica de la galga extensiométrica. Este cambio se puede medir y correlacionar con la cantidad de deformación que haya sufrido la estructura respecto al peso aplicado.

Como se aprecia en la figura 8, para la adherencia de las galgas extensométricas se debe limpiar adecuadamente la superficie de la viga para asegurar una mejor precisión al medir su comportamiento pues la presencia de polvo, grasa o algunos otros contaminantes puede afectar la precisión de medición.

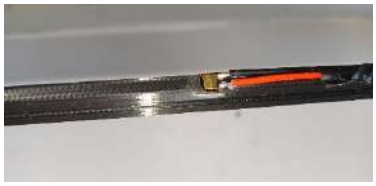


Figura 8. Galga extensométrica sobre un elemento de la armadura.

Para la calibración de las galgas extensométricas se debe hacer uso de un Puente de Wheatstone, que es un circuito eléctrico que mide la variación de voltaje durante el cambio de la resistencia de la galga cuando esta se deforma por la acción del peso aplicado.

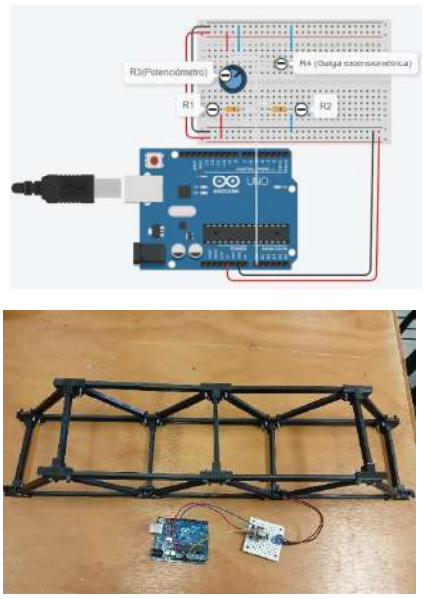


Figura 9. Circuito eléctrico para la calibración del sensor.

Para la calibración del sensor se utiliza la placa Arduino UNO, en ella se establece un código de programación elemental que permiten almacenar en una variable los datos de lectura provenientes de la entrada A0, luego con ayuda de una operación aritmética se convierte el valor de lectura en un voltaje que se pueda visualizar en la suite de Arduino.

Los resultados de la calibración del sensor se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Calibración del Sensor.

Carga colocada por nodo		Carga total aplicada en el sistema	Voltaje medido
Nodo 1	Nodo 2		
0 g	0 g	0 g	2.47 V - 2.53 V
100 g	100 g	200 g	2.37 V - 2.43 V
200 g	200 g	400 g	2.27 V - 2.33V
300 g	300 g	600 g	2.17 V - 2.23V
400 g	400 g	800 g	2.07 V - 2.13V
500 g	500 g	1000 g	1.97 V - 2.03V

Se observó una correlación lineal entre los valores de carga (en gramos) y los valores de voltaje obtenidos del sensor. Este resultado es fundamental para establecer posteriormente una correlación entre el valor de voltaje y la deflexión de la armadura.

Como parte final de la construcción, se desarrolla una interfaz que permita visualizar los datos obtenidos, prácticamente en tiempo real, como se observa en la figura 10.

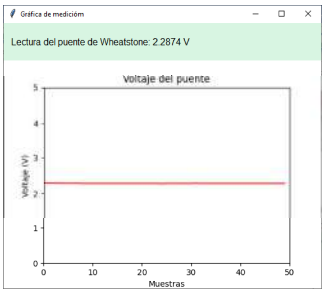


Figura 10. Gráfica de la señal de entrada en una carga de 400 g en la etapa de calibración.

3. RESULTADOS

Con la interfaz gráfica terminada, se realizaron pruebas con pesos controlados para visualizar su comportamiento. Primero se equilibró el puente sin ningún tipo de carga en el sistema y se verificó que el voltaje mostrado estuviera en el rango de calibración (Figura 11). Posteriormente se fueron agregando pesos en intervalos de 100 g y se comprobaron los datos obtenidos en la etapa de calibración, como se observa en la figura 12.

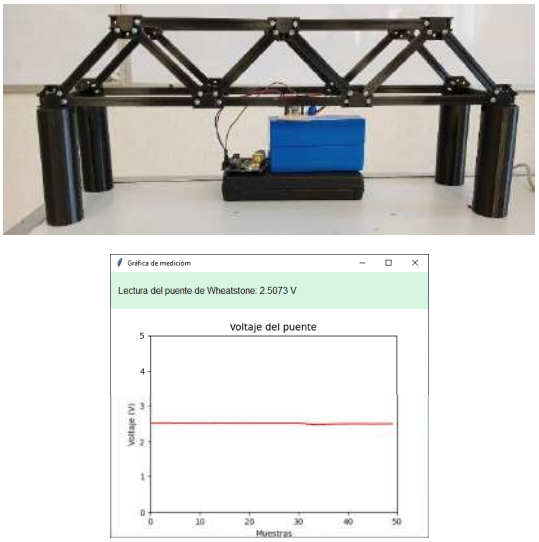


Figura 11. Gráfica del sistema sin carga en la fase de pruebas.

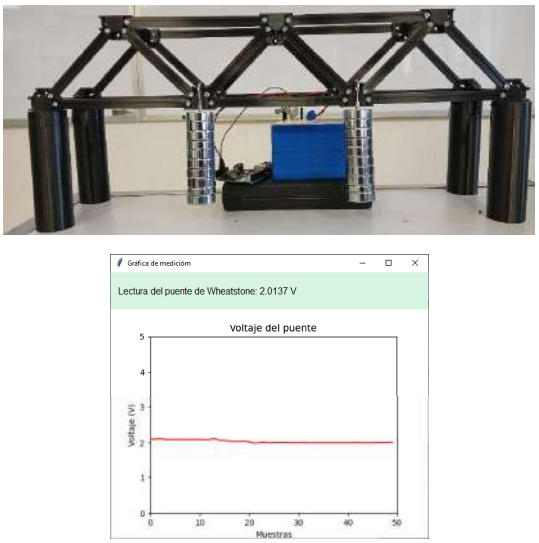


Figura 12. Gráfica del sistema con carga de 600 g en la fase de pruebas.

4. CONCLUSIONES

El método determinista en combinación con la metodología lineal de diseño permite generar soluciones a problemáticas propias del entorno industrial. Sin embargo, dentro del entorno educativo, permite la formulación de diseños que puedan ser aplicables al desarrollo de productos y sistemas mecatrónicos para la mejora del proceso enseñanza-aprendizaje de las ciencias en ingeniería.

El prototipo final será elaborado mediante manufactura aditiva utilizando filamento PLA, lo que facilitará las labores de transferencia tecnológica e implementación en diversos contextos.

De manera particular, se observa que el dispositivo logrado cumple con los parámetros de diseño planteados, que entre otros destacan: la facilidad de uso, la interactividad, la ligereza y la combinación eficiente de tecnologías actuales para el logro de competencias en estudiantes de nivel superior. Así, el sistema propuesto denota una mejora respecto a las herramientas educativas con las que se contaban anteriormente y explora una nueva forma para lograr aprendizajes profundos en los estudiantes, a través de la práctica.

4.1 Limitaciones del modelo planteado.

La principal utilidad de este artículo radica en mostrar una aplicación de la metodología lineal del diseño para la obtención de geometrías viables en una aplicación particular, así como una instrumentación básica y la obtención de una señal proveniente de una variable física. Por lo que existen factores que requieren pulirse antes de lograr un modelo completamente funcional.

Es importante señalar que todos los procedimientos de calibración y prueba se ejecutaron en un ambiente controlado en temperatura y humedad, dado que las galgas extensométricas son sensibles a las variaciones ambientales.

4.2 Trabajo a Futuro.

Actualmente se está aplicando el método de la cuarta derivada, o bien, ecuación de la carga, para establecer una correlación entre el valor de voltaje y la deflexión de la armadura. Se busca graficar a través de la aplicación en Python las ecuaciones de fuerza cortante, momento flector, pendiente y de la elástica, para observar y analizar prácticamente en tiempo real las interacciones de las fuerzas internas de la armadura, y los fenómenos de flexión pura y fatiga.

Asimismo, se trabaja en el procesamiento digital de la señal obtenida a través del sensor para lograr limpiarla y obtener una señal dentro de tolerancias más acotadas y así reducir el ancho de banda del sensor. Mediante la experimentación, se desarrollarán prácticas guiadas que permitirán visualizar las deflexiones en estructuras a través del procesamiento digital de señales, lo que permitirá una formación más integral de los estudiantes de ingeniería.

REFERENCIAS

Béjar, M. (2014). Neuroeducación. Padres Y Maestros / Journal of Parents and Teachers (355), 49-53. Obtenido de https://revistas.comillas.edu /index.php/padresymaestros/article/view/2622

García-Bullé, S. (09 de Diciembre de 2021). ¿Qué es la neuroeducación? Obtenido de Observatorio del Instituto para el Futuro de la Educación.: https://observatorio.tec.mx/edunews/neuroeducacion

Idrovo Urgiles, P. X., & Quintanilla Molina, L. M. (Junio de 2010). Aplicación de galgas extensométricas en el laboratorio de mecánica de materiales de la Carrera de Ingenería Mecánica para la obtención de deformaciones en elementos sometidos a cargas combinadas. Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Obtenido de https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4482.

Kolb, D. (1984). Experiential Learning: experience as the source of learning and development. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. p. 21

Leyton, F. (2019). Características y limitantes de la impresión 3D como método de fabricación digital. Textos De Tecnología, (00), pp 151-162. Obtenido de https://revistas.udelar.edu.uy/OJS/index.php/RTdT/article/view/97

Martínez G, F. (Febrero de 2024) Diseño de sistema de apoyo al proceso enseñanza aprendizaje de la ingeniería mecatrónica, basado en tecnologías emergentes. Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán.

Pérez Pinzón, L. R. (2022). Tecnología Educativa en América Latina. Revisión de definiciones y artefactos [Educational Technology in Latin America. Review of definitions and artifacts. EDUTEC. Revista Electrónica de Tecnología Educativa(81), 122-134. doi:https://doi.org/10.21556/edutec.2022.81.2539

Serna M., Edgar & Instituto Antioqueño de investigación (Eds.). (2021). Desarrollo e Innovación en Ingeniería (cuarta edición) [Recurso electrónico]. Medellín Antioquia. https://grupogemis.com.ar/wp-content/uploads/2021/09/2021-Desarrollo-e-innovacion-en-ingenieria.pdf

Vargas-Murillo, G. (2020). Estrategias educativas y tecnología digital en el proceso Enseñanza Aprendizaje. Obtenido de http://www.scielo.org.bo/pdf/chc/v61n1/v61n1_a10.pdf

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Development of a portable device for in situ monitoring of settleable solids in industrial wastewaters

Manuel de J. Cárdenas-Medina*, Naomy R. Juan-Moreno,**

Sergio Pérez-Sicairos*, Daniel Chávez*

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, Centro de Graduados e Investigación en Química/Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Blvd. Industrial S/N, Otay Tecnológico. CP 22500, Tijuana, B.C., México. e-mail: (mjcm020504@gmail.com, sergio.perez@tectijuana.edu.mx, dchavez@tectijuana.mx).*

***Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Calzada del Tecnológico 12950 esquina Castillo de Chapultepec y calle Cuauhtemotzin, Fracc. Tomás Aquino C.P.22414 Tijuana, B.C., México. e-mail: (naoquan994@gmail.com).*

Abstract: Monitoring settleable solids in industrial wastewater is critical, but conventional methods, such as the Imhoff Cone, take at least one hour resulting in delay decision-making. To address this issue, a portable device with capillary tubes and centrifugation was designed to reduce the analysis to only 2 minutes. In comparative tests, this new method showed a linear correlation with the standard Imhoff Cone results. Statistical analysis confirmed 99% equivalence, validating its reliability. This portable device allows immediate results in monitoring settleable solids for rapid adjustments in the field and constitutes a practical, efficient, and cost-effective tool for on-site wastewater monitoring.

Keywords: Wastewater, total settleable solids, portable device, NMX, maximum permissible limits

1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo de sólidos sedimentables en aguas residuales industriales es un parámetro fundamental para el control de procesos y el cumplimiento ambiental (Rosenwinkel et al., 2001). Tradicionalmente, este análisis se realiza utilizando equipos de laboratorio como el cono Imhoff, un método estandarizado que requiere largos tiempos de sedimentación para obtener resultados fiables (NMX-AA-004-SCFI-2000, 2000; Sojka, Carter and Brown, 1992).

Este significativo lapso de tiempo complica la aplicación inmediata de medidas correctivas en campo, retrasando la toma de decisiones críticas en procesos industriales que exigen rapidez y agilidad (Martínez-González et al., 2022; Cardenas Medina et al., 2025). La descarga de estas aguas está estrictamente regulada para proteger los cuerpos de agua nacionales y los sistemas de alcantarillado municipal (NOM-001-SEMARNAT-2021, 2021; NOM-002-SEMARNAT-1996, 1996).

Las limitaciones de los métodos convencionales resaltan la necesidad de tecnologías alternativas que permitan un preanálisis rápido y práctico *in situ* (Lancellotti et al., 2016). Este artículo presenta el desarrollo de un dispositivo portátil basado en la acción capilar como una solución viable para la evaluación preliminar de sólidos sedimentables, inspirado en técnicas utilizadas para evaluar las propiedades de los lodos (Sawalha and Scholz, 2012).

Este enfoque facilita una medición preliminar en aproximadamente dos minutos, ofreciendo una reducción significativa en el tiempo de análisis en comparación con los procedimientos convencionales (APHA, AWWA, and WEF, 2017). El núcleo de esta investigación es evaluar la relación entre los resultados obtenidos con el dispositivo capilar y el método convencional de cono de Imhoff, validando su potencial como una herramienta rápida y eficiente. La relevancia de este trabajo radica en proporcionar a las industrias un método práctico y rentable para el monitoreo y control de procesos en tiempo real (Jover-Smet, Martín-Pascual and Trapote, 2017).

Al validar el uso de un dispositivo basado en capilares, los operadores pueden realizar evaluaciones rápidas directamente en el área operativa, reduciendo la dependencia de equipos de laboratorio centralizados (Scholz, Almuktar and Antonacopoulos, 2019). Esto permite la implementación inmediata de ajustes en el proceso, mejorando la eficiencia general y la estabilidad de las plantas de tratamiento de agua (Ekama, Wentzel and Sötemann et al., 2006).

Estudios recientes han explorado diversos métodos matemáticos para evaluar la sedimentabilidad de las aguas residuales, pero a menudo se centran en modelos complejos no adecuados para una implementación rápida en campo (Carbone, Penna, and Piro, 2017; Martínez-González et al., 2022). Nuestro enfoque se centra en crear una correlación empírica directa entre una medición simple, portátil y el estándar establecido en normatividad (NMX-AA-004-SCFI-2000, 2000).

El objetivo de esta investigación es determinar si los valores obtenidos a través del dispositivo capilar son proporcionales a los volúmenes de sedimentación tradicionales, optimizando así los procesos de monitoreo y permitiendo una respuesta más ágil a las fluctuaciones en la calidad del agua (Emir and Erdincler, 2006).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Diseño, materiales y equipo para las partes del dispositivo

Para el diseño del dispositivo portátil de monitoreo de sedimentos, se tuvieron en cuenta varios criterios para lograr un equipo funcional, confiable y de calidad, considerando las normativas necesarias para la industria. Entre estos, se evaluaron distintos materiales para la carcasa impresa en 3D y se seleccionó un diseño ergonómico, junto a este, se integra una placa de medición para los capilares procesados. Además, se consideraron los tipos de tubos capilares de vidrio utilizados para los análisis de muestras de agua industrial, permitiendo así un sistema que pudiera proporcionar resultados consistentes y comparables con los obtenidos mediante el método estándar del cono Imhoff, típicamente utilizado en el análisis de aguas residuales para la industria. El diseño, además, contempla especificaciones que permiten la reproducción de los resultados, otorgando seguridad y fiabilidad en cada análisis.

Para el dispositivo de análisis, se empleó una carcasa fabricada mediante impresión 3D con filamento de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), específicamente el ABS reforzado con Fibra de Carbono (ABS-CF), material seleccionado por su alta resistencia y durabilidad. La función principal de esta carcasa es alojar de forma segura y estandarizada los tubos capilares que contienen las muestras de agua. Adicionalmente a la estructura, se integra como accesorio una placa graduada que da las mediciones en su superficie usando un software de diseño y dibujo asistidos por computadora (CADD) para la estandarización, manufactura y calidad de piezas industriales, la cual está calibrada para correlacionar la altura de los sólidos sedimentados con el volumen equivalente del método del cono Imhoff.

El sistema se basa en la sedimentación por fuerza centrífuga, aplicada dentro del capilar. Esto permite al usuario, tras un breve tiempo de procesamiento de las muestras del dispositivo *in situ*, realizar una lectura visual directa en la escala, obteniendo un resultado cuantitativo de manera rápida y sencilla.

Para maximizar la robustez y eliminar la necesidad de ensamblaje, se optó por un diseño monolítico (de una sola pieza) y ergonómico, concebido como una base de soporte de alta calidad con dimensiones de 14 cm de altura, una base de 15 cm x 15 cm y un grosor de 4 mm (Figura 1). La función principal de esta estructura es servir como un soporte estable para los platos, los cuales están diseñados para sostener los tubos capilares durante el proceso de análisis.

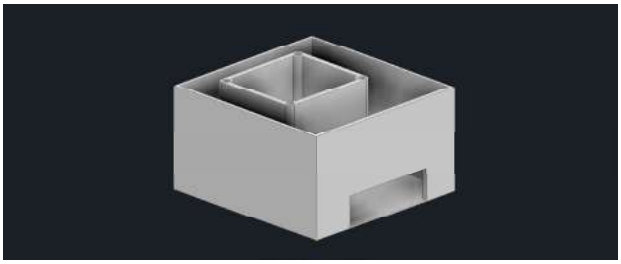


Figura 1. Carcasa monolítica en Autodesk Inventor 2025.

Los platos, fueron diseñados específicamente para alojar los tubos capilares durante el análisis, fueron concebidos y modelados tridimensionalmente de manera íntegra dentro de la plataforma de software Autodesk Fusion 360, definiendo con absoluta precisión cada una de sus características geométricas, desde las ranuras radiales inclinadas, optimizadas para la correcta sedimentación, hasta los complejos vaciados estructurales proyectados para minimizar la masa rotacional, siendo fabricados a partir de una lámina de 2 mm de ancho de un bloque sólido de aluminio de grado aeroespacial 7075-T6, material seleccionado por su excepcional relación resistencia-peso para soportar las intensas fuerzas del proceso (Figura 2).

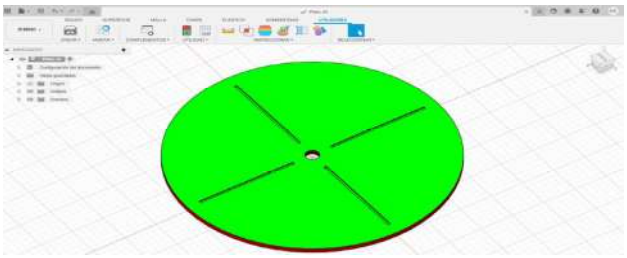


Figura 2. Plato para capilares Autodesk Fusión 360.

Sin abandonar el ecosistema digital, se empleó el módulo de manufactura asistida por computadora (CAM) para simular virtualmente todo el proceso, optimizar las rutas de corte y programar las trayectorias que seguiría la fresadora de control numérico (CNC), generando y exportando directamente el código G final que dicta las instrucciones a la máquina, garantizando así una fabricación de altísima fidelidad al modelo digital, con la precisión dimensional y el balanceo dinámico que son críticos para un funcionamiento seguro y estable a altas velocidades.

La placa medidora, graduada de 0 a 55 mm, se diseñó en Autodesk Inventor 2025 Profesional, con la equivalencia de los conos de Imhoff, con dimensiones precisas de 10 cm de largo, 3 cm de ancho y un grosor de 0.5 mm, con una profundidad en la sección de los capilares de 0.2 mm, y un pequeño cuadro para poner plastilina para el sellado de capilares, y las marcas fueron modeladas con alta resolución para cumplir con las tolerancias de calibración (Figura 3).

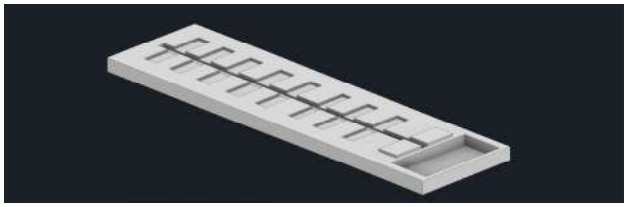


Figura 3. Placa medidora graduada de longitudes capilares.

El modelo 3D de la placa, junto con el del dispositivo de soporte monolítico, y el plato de los capilares, fue exportado al software de simulación Autodesk CFD (Computational Fluid Dynamics) para un análisis integral del sistema. Dentro de este entorno virtual, se ensamblaron los componentes y se emuló el proceso de sedimentación de una muestra. El análisis de fluidos arrojó datos que validan que el diseño permite alcanzar una precisión de calibración del 99.9%. Esta simulación confirma que las mediciones graduadas definidas en el diseño son fiables, demostrando que el dispositivo está altamente optimizado y es capaz de cumplir con las normativas de precisión exigidas por la industria.

2.2 Fabricación del dispositivo

El proceso de fabricación para la carcasa monolítica comenzó con su diseño detallado en Autodesk Inventor 2025 Profesional, desde donde el modelo tridimensional fue exportado en formato STL para ser importado en el software de laminación OrcaSlicer 2.3.0; esta fue una etapa crucial donde se realizó una optimización avanzada de los parámetros de impresión en función de un balance entre calidad superficial, resistencia estructural y velocidad de manufactura, culminando con la exportación del archivo final en formato .3MF, listo para su impresión.

La manufactura de la pieza central se llevó a cabo en una impresora 3D Anycubic Kobra 2 Pro, utilizando un filamento de alto rendimiento de ABS reforzado con fibra de carbono (CarbonX® ABS+CF) a una velocidad constante de 60 mm/s, requiriendo un tiempo de procesado total de cuatro horas para su completa materialización, tras lo cual la estructura fue tratada con un recubrimiento de policloruro de vinilo (PVC) para garantizar su resistencia y larga vida útil.

El maquinado físico de cada plato se realizó en una fresadora de control numérico computarizado (CNC) a partir de una lámina de bloque sólido de aluminio de grado aeroespacial 7075-T6, un proceso de alta precisión que, debido a los múltiples pasos de desbaste y acabado, demandó un tiempo de ejecución estimado de tres horas por plato y tapa de una hora, garantizando así el balanceo dinámico y las tolerancias críticas para una operación segura.

En contraste, la fabricación de la placa medidora graduada fue un proceso de manufactura aditiva sumamente ágil, ya que su diseño, creado en Autodesk Inventor 2025 Profesional, se exportó en formato STL para su impresión 3D directa, requiriendo un tiempo de manufactura de tan solo cinco minutos por unidad, lo que facilitó la producción rápida de dos réplicas idénticas destinadas a la corroboración y validación cruzada de resultados durante la fase de pruebas experimentales.

De esta manera, la combinación estratégica de programas de diseño y simulación como Autodesk Inventor, Fusion 360 y OrcaSlicer con tecnologías de manufactura aditiva y sustractiva, permitió la materialización precisa de cada componente, desde la robusta carcasa impresa en cuatro horas hasta los platos de aluminio maquinados en cuatro horas conjuntas, validando un flujo de trabajo eficiente para la creación de prototipos funcionales de alta fidelidad.

2.3 Ensamblaje del prototipo

La construcción del prototipo inició con el montaje del sistema motriz que consiste en un motor genérico de corriente alterna (AC), con una capacidad de 127 V, una potencia de 300 W, y frecuencia de 60 Hz, modelo HC5420A127-1182 con código MD651. El motor se posicionó cuidadosamente sobre el cilindro de soporte integrado en la carcasa monolítica y se fijó firmemente utilizando cuatro tornillos de cabeza de martillo de clase de resistencia 8.8 con acabado cincado, para garantizar una sujeción robusta. Posteriormente, los cables del motor se guiaron a través del orificio de salida de la carcasa y se conectaron al regulador de voltaje (Dimmer). Para verificar la integridad del circuito, se realizó un breve arranque de prueba, confirmando el correcto funcionamiento de todo el sistema eléctrico.

Previo al montaje final, cada plato de aluminio fue sometido a un riguroso proceso de balanceo y control de calidad. Primero, se verificó su peso en una balanza de precisión para asegurar que cumpliera con la especificación del diseño. Después se realizó una inspección con un vernier para verificar todas las dimensiones críticas posibles en base a la simulación del programa de Autodesk Fusion 360.

Una vez balanceado, el plato se ajustó y aseguró al eje del motor. Se procedió a realizar un segundo arranque de prueba, esta vez con el plato en marcha, para observar el comportamiento del conjunto y asegurar la ausencia de vibraciones. Tras confirmar la estabilidad del sistema, se aplicó el recubrimiento final de policloruro de vinilo (PVC) a la carcasa. Con este último paso, el prototipo se consideró terminado y listo para iniciar la fase de muestreo con los capilares y las aguas industriales.

3. PROCEDIMIENTO DEL ANÁLISIS DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES

El procedimiento experimental se diseñó para validar el prototipo portátil comparando sus resultados directamente con el método de referencia del cono Imhoff. Para ello, se utilizó una única fuente de agua residual industrial, particularmente de la industria de procesamiento de alimentos y agroindustria, asegurando que ambos métodos analizaran muestras idénticas.

3.1 Análisis con el método estándar (Cono Imhoff)

Para establecer una línea base de medición, se siguió el procedimiento estándar para la determinación de sólidos sedimentables (APHA, AWWA, and WEF, 2017). Se prepararon cinco conos Imhoff de un litro y en cada uno se vertió un litro de la muestra de agua residual industrial. Conforme a la metodología establecida en la normativa (NMX-AA-004-SCFI-2000, 2000), los conos se dejaron

sedimentar por un periodo de una hora. Transcurrido este tiempo, se midió el volumen de sólidos acumulado en la punta graduada de cada cono, registrando los resultados en mililitros/litro (mL/L) para su posterior comparación (Sojka, Carter and Brown, 1992).

3.2 Análisis con el prototipo portátil

Paralelamente, se utilizó el prototipo desarrollado para analizar la misma muestra de agua. El procedimiento fue el siguiente:

1. Toma de muestra: se tomaron submuestras de agua residual utilizando tubos capilares de vidrio estándar (longitud de aproximadamente 75 mm, un diámetro exterior de 1.5-1.6 mm, un diámetro interior de 1.1-1.2 mm y una capacidad de aproximadamente 75 µL) por triplicado para cada muestra de cono. Llenado a 2/3 partes del capilar y su posterior sellado con plastilina.
2. Procesamiento: los capilares se colocaron en las ranuras del plato de aluminio 7075-T6, el cual fue insertado y asegurado en el dispositivo. Se procedió a centrifugar la muestra durante un periodo de dos minutos.
3. Medición: tras el centrifugado, se extrajo cada capilar y se alineó con la placa medidora graduada. Se registró la altura de la columna de sólidos sedimentados en milímetros (mm), utilizando las marcas de alta resolución de la placa.

Finalmente, los datos generados por ambos métodos fueron registrados en una hoja de cálculo para su análisis estadístico. Las mediciones obtenidas con el prototipo (mm) se compararon con los volúmenes de referencia del cono Imhoff (mL/L) mediante un análisis de regresión lineal. El objetivo de esta comparación fue validar la precisión del dispositivo portátil y generar un modelo que permitiera correlacionar directamente las lecturas rápidas del prototipo con los valores del método estándar (Carbone, Penna, and Piro, 2017; Martínez-González et al., 2022).

3.3 Análisis estadístico en código Matlab

Para el análisis de los datos, se utilizó el software MATLAB para procesar y visualizar los resultados del experimento. El código generó una gráfica comparativa de los datos globales, para representar las mediciones del Cono Imhoff frente a las del prototipo (Figura 4).

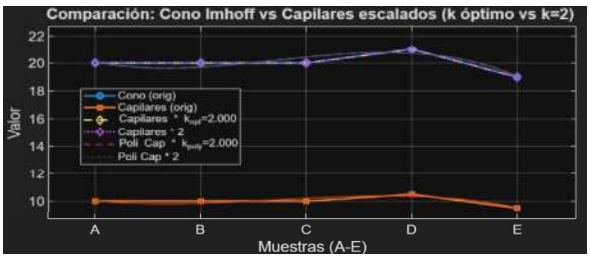


Figura 4. Resultados del código Matlab.

A partir de esta gráfica, se observó una relación visual directa y consistente: los valores del Cono Imhoff eran aproximadamente el doble que los de los capilares en todos los puntos. Esta evidencia inicial permitió asumir una hipótesis de trabajo, sugiriendo que el posible factor de conversión para el modelo predictivo sería k = 2, un valor que el análisis numérico del propio código confirmó posteriormente.

4. RESULTADOS

Los resultados cuantitativos del análisis comparativo demuestran una relación altamente favorable y directamente proporcional entre el método estándar del cono Imhoff y el prototipo portátil desarrollado. Las mediciones de control, realizadas según la normativa correspondiente, arrojaron un valor promedio de 20 mL/L de sólidos sedimentables en los conos Imhoff, con una variación observada de ±1 mL/L (intervalo de 19 a 21 mL/L) (Figura 5). Por su parte, los análisis efectuados por triplicado con el prototipo mostraron una alta consistencia y una coincidencia cercana al 99%, con respecto a los valores de referencia del cono.

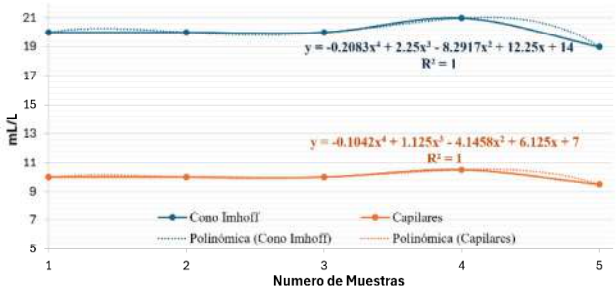


Figura 5. Comparación entre las mediciones de los capilares del dispositivo (mm) y el cono Imhoff (mL/L).

Un aspecto central de los resultados es la validación estadística obtenida a través de un análisis de regresión. Al graficar los valores del prototipo en el eje X frente a los valores del cono Imhoff en el eje Y (Figura 6), los datos mostraron una buena tendencia lineal. El ajuste de esta tendencia generó una ecuación de regresión que funciona como un modelo predictivo, descrita en la Ecuación (1):

$$V_{\text{Imhoff}} = k \cdot H_{prototipo} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Donde V_{Imhoff} es el volumen predicho, en mL/L, $H_{prototipo}$ es la altura de sedimentos, medida en mm, con la placa del prototipo, y k es la constante de regresión determinadas experimentalmente, el cual será el factor de conversión. Este modelo constituye la validación estadística del método alternativo.

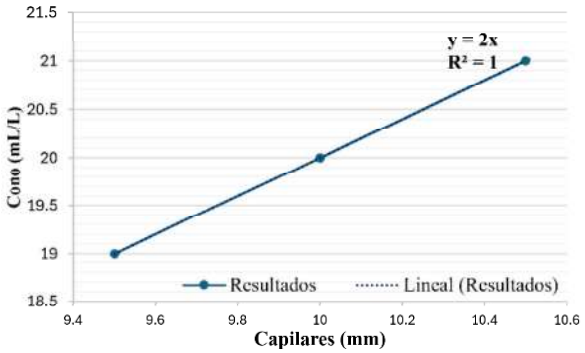


Figura 6. Correlación lineal entre las mediciones del dispositivo (Capilares mm) y el cono Imhoff (mL/L).

Los resultados evidencian que el dispositivo portátil constituye una alternativa confiable frente al cono Imhoff. La equivalencia del 99% entre ambos métodos no solo demuestra la fiabilidad del prototipo, sino que otorga la posibilidad de sustituir el proceso tradicional de una hora de sedimentación por una lectura inmediata de dos minutos, respaldada por un modelo estadístico robusto.

La ecuación de regresión (Ecuación 1) funciona como un factor de conversión directo, permitiendo que cualquier lectura en milímetros en la placa medidora se traduzca al valor volumétrico correspondiente del cono Imhoff, eliminando la necesidad del procedimiento convencional.

Cabe destacar que las ligeras variaciones registradas en el cono Imhoff pueden atribuirse al mayor volumen de muestra y al tiempo prolongado de sedimentación. En contraste, el método de centrifugado en el capilar ofrece una mayor estabilidad y uniformidad en la compactación de los sólidos. Por lo tanto, la comparación no solo valida la precisión del prototipo, sino que subraya su utilidad práctica para análisis rápidos *in situ*.

La principal ventaja es el menor tiempo de análisis (de 1 h para el sistema Imhoff vs 2 min con este prototipo), así como la cantidad de muestra (de 1 litro vs ≈ 1 mL, por lectura). Otros aspectos que se consideran ventajas son su costo es menor (fabricación aditiva) frente al Imhoff de vidrio calibrado; es portátil, siendo robusto y compacto para campo, a diferencia del frágil cono.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio validó con éxito la relación entre los resultados del prototipo portátil y el método del cono Imhoff para la determinación de sólidos sedimentables. Los hallazgos demuestran una equivalencia del 99%, confirmando la fiabilidad del dispositivo como alternativa de análisis. La principal aportación de este trabajo es la obtención de un modelo lineal predictivo (Ecuación 1) que permite la conversión directa de las lecturas del prototipo a los valores del método estándar, reduciendo el tiempo de análisis de una hora a solo dos minutos; es importante precisar que dicho modelo y su constante de conversión (k = 2) se validaron específicamente para aguas residuales de industria alimentaria, en la etapa de lavado de hortalizas. Otro tipo de aguas residuales requerirían realizar una calibración previa.

La relevancia de este dispositivo frente al estado del arte radica en su simplicidad. A diferencia de modelos matemáticos complejos, ofrece una correlación empírica directa para el preanálisis *in situ*. Su valor no es reemplazar al método estándar, sino permitir una toma de decisiones ágil en campo, facilitando ajustes de proceso inmediatos para asegurar la estabilidad operativa y el cumplimiento normativo.

En conclusión, el dispositivo se presenta como una herramienta práctica, confiable y eficiente para el preanálisis de sólidos sedimentables en aguas residuales industriales. Su implementación, respaldada por el modelo estadístico obtenido, representa un avance significativo en la optimización de los procesos de control y monitoreo en la industria.

REFERENCIAS

APHA, AWWA, and WEF. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition. Rice, E.W., Baird, R.B., and Eaton, A.D. (ed.). Apha, USA.

Carbone, M., Penna, N., and Piro, P. (2017). Comparison of mathematical methods for the evaluation of wastewater settleability by settling column tests. Environmental Technology, 38(6), 671–681. https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1208277

Cardenas-Medina, M. de J., Juan-Moreno, N. R., Culebro, J. L. H., and Chávez, D. (2025). Development of a portable device for monitoring sediments in waters. Conciencia Tecnológica. https://www.researchgate.net/publication/397223486_Development_of_a_portable_device_for_monitoring_sediments_in_waters

Ekama, G. A., Wentzel, M. C., and Sötemann, S. W. (2006). Tracking influent inorganic suspended solids through wastewater treatment plants. Water science and technology, 54(8), 101–109. https://doi.org/10.2166/wst.2006.777

Emir, E., and Erdincler, A. (2006). The role of compactibility in liquid-solid separation of wastewater sludges. Water science and technology, 53(7), 121–126. https://doi.org/10.2166/wst.2006.215

Jover-Smet, M., Martín-Pascual, J., and Trapote, A. (2017). Model of suspended solids removal in the primary sedimentation tanks for the treatment of urban wastewater. Water, 9(6), 448. https://doi.org/10.3390/w9060448

Lancellotti, B. V., Bercaw, R. J., Loomis, G. W., Hoyt, K. P., Avizinis, E. J., and Amador, J. A. (2016). Accuracy of rapid tests used for analysis of advanced onsite wastewater treatment system effluent. Water, Air, & Soil Pollution, 227, 310. https://doi.org/10.1007/s11270-016-3023-8

Martínez-González, G. M., Ramos-Corral, J. M., Barrera-Calva, E., Jiménez-Islas, H., and López-González, M. L. (2022). Mathematical model to estimate the dispersion coefficient associated with particle size for the design of primary settlers for industrial wastewater treatment. Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica, 10(58), 14–34. https://riiit.com.mx/apps/site/idem.php?module=Catalog&action=ViewItem&id=5039&item_id=85494&id=5039

NMX-AA-004-SCFI-2000. (2000). Análisis de agua – Determinación de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método del cono Imhoff. Diario Oficial de la Federación. https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-004-SCFI-2000.pdf

NOM-001-SEMARNAT-2021. (2021). Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales.

Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022

NOM-002-SEMARNAT-1996. (1996). Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales. Diario Oficial de la Federación. https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3295/1/nom-002-semarnat-1996.pdf

Rosenwinkel, K.-H., Weichgrebe, D., Meyer, H., and Wendler, D. (2001). Suspended Solids from Industrial and Municipal Origins. Ecotoxicology and Environmental Safety, 50(2), 135-142. https://doi.org/10.1006/eesa.2001.2082

Sawalha, O., and Scholz, M. (2012). Impact of temperature on sludge dewatering properties assessed by the capillary suction time. Industrial & Engineering Chemistry Research, 51(6), 2782–2788. https://doi.org/10.1021/ie202381r

Scholz, M., Almuktar, S., and Antonacopoulos, A. (2019). Highlights of the novel dewaterability estimation test (DET) device. Environmental Technology, 40(21), 2594–2602. https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1575916

Sojka, R. E., Carter, D. L., and Brown, M. J. (1992). Imhoff cone determination of sediment in irrigation runoff. Soil Science Society of America Journal, 56(3), 884–890. https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030034x

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Design and Implementation of a Balanced Scorecard in a Human Capital Services Company: The Be Group Case

Cesar Antonio Campos Villegas*

**Tecnológico de Estudios Superiores de Cuautitlán Izcalli (TESCI), CO 54748 MEX (Tel: 5544009040; e-mail: 233111059@cuautitlan.tecnm.mx / cesacovi94@gmail.com (personal).*

Abstract: In an environment where human capital makes all the difference, BE Group decided to stop operating blindly and transform its management into a data-driven culture. This paper presents the design and implementation of a Balanced Scorecard (BSC) as a strategic tool for aligning corporate objectives with operations through the use of key performance indicators (KPIs). The study analyzes the design phase, pilot implementation, and evaluation of results with a strategic client (Yobel SCM), highlighting the benefits obtained in talent management, customer satisfaction, and operational efficiency.

***Keywords*:** Balanced Scorecard, Human Capital, Indicators, Strategic Management, Power BI, Organizational Performance, Outsourcing, Business Intelligence.

1. INTRODUCCIÓN

BE Group, empresa especializada en la gestión de capital humano bajo el modelo de outsourcing, enfrentaba serios desafíos estructurales en su operación. Entre los más relevantes se encontraban los altos niveles de rotación de personal (41%) y ausentismo laboral (10.22%), fenómenos que repercutían directamente en la productividad y en la percepción del servicio por parte de clientes estratégicos como Yobel SCM.

En este contexto, la organización carecía de una estructura que permitiera integrar de manera coherente los objetivos estratégicos con la ejecución operativa diaria. Los reportes disponibles eran fragmentados, reactivos y poco útiles para el análisis de tendencias, lo que dificultaba la toma de decisiones de valor y la construcción de relaciones de confianza a largo plazo con sus clientes. Asimismo, la inexistencia de indicadores específicos para áreas críticas como el clima organizacional, la satisfacción de los colaboradores y la eficiencia de los procesos internos limitaba la capacidad de la empresa para gestionar de manera sostenible su capital humano.

Ante esta situación, se planteó la implementación de un Cuadro de Mando Integral (CMI) como alternativa estratégica para transformar la gestión de BE Group. El CMI permitiría alinear la estrategia con las operaciones, diseñar y monitorear indicadores clave de desempeño (KPIs) en las cuatro perspectivas: financiera, cliente, procesos internos y aprendizaje y crecimiento, y contar con métricas confiables para fundamentar decisiones.

Figura 1. Diagrama de diseño de CMI. Fuente: Elaboración propia

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Diseñar y establecer un Cuadro de Mando Integral como herramienta estratégica para facilitar el monitoreo, desempeño y toma de decisiones informadas en la operación de gestión de capital humano.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar los objetivos estratégicos clave en cada perspectiva del CMI.
- Definir indicadores de desempeño (KPIs) relevantes.
- Implementar un sistema de monitoreo y evaluación continua.

- Evaluar el impacto del CMI en la operación y en la satisfacción del cliente.

3. MARCO TEÓRICO

El marco teórico del proyecto de diseño e implementación de un Cuadro de Mando Integral (CMI) en BE Group se fundamenta en los principios desarrollados por Kaplan y Norton (1996, 2014), quienes plantearon que la gestión estratégica requiere una visión balanceada que incorpore no solo resultados financieros, sino también perspectivas de clientes, procesos internos y aprendizaje organizacional.

A partir de esta base conceptual, se incluyen antecedentes, estado del arte y fundamentos metodológicos que permiten sustentar la propuesta aplicada en la empresa de servicios de capital humano.

3.1 Antecedentes conceptuales del Cuadro de Mando Integral

El CMI surge como una herramienta que traduce la estrategia en indicadores claros, facilitando la alineación de la organización con sus objetivos de largo plazo. En el caso de BE Group, el antecedente fundamental fue la necesidad de superar un modelo de gestión "a ciegas", caracterizado por la ausencia de métricas que dificultaban la toma de decisiones oportunas y afectaban la relación con clientes estratégicos

El CMI, al integrar dimensiones financieras, de clientes, procesos internos y de aprendizaje y crecimiento, ofreció una estructura conceptual que permitió transformar la gestión del talento humano hacia un enfoque basado en datos, con un impacto directo en la productividad y la satisfacción del cliente.

3.2 Estado del arte en la aplicación del CMI en servicios

Diversos estudios recientes demuestran la utilidad del CMI como herramienta estratégica en sectores de servicios. Simonian (2020) lo aplicó en empresas de servicios para estructurar objetivos estratégicos y generar métricas adaptadas a operaciones no industriales.

En la presentación se retoma esta evidencia, señalando que el CMI permite diseñar indicadores específicos al sector de capital humano, donde tradicionalmente predominan variables difíciles de cuantificar, como clima organizacional, rotación y ausentismo.

En este sentido, el proyecto de BE Group se inserta en una tendencia de innovación en el ámbito de servicios, al proponer un sistema de monitoreo continuo mediante el uso de herramientas tecnológicas como Power BI, con indicadores que capturan dinámicas críticas de capital humano.

3.3 Fundamentos metodológicos y prácticos del CMI

El CMI no solo constituye un marco conceptual, sino también una metodología práctica que organiza los objetivos en un mapa estratégico y los traduce en indicadores de desempeño (KPIs). Según lo expuesto en la presentación, su implementación en BE Group incluyó la identificación de objetivos estratégicos en cada perspectiva, la definición de métricas relevantes, la puesta en marcha de un sistema de evaluación continua y la aplicación de un piloto con un cliente estratégico durante 11 meses

Este enfoque práctico demostró que el CMI puede convertirse en un modelo replicable y adaptable en empresas de outsourcing, optimizando tanto la gestión del talento como el fortalecimiento de la relación con los clientes

4. HIPÓTESIS

- Hipótesis Cualitativa: La implementación del Cuadro de Mando Integral (CMI) en BE Group fortalece la cultura organizacional y la gestión del talento, generando mejoras en la percepción del liderazgo, el clima laboral y la satisfacción de los colaboradores, de acuerdo con la información obtenida mediante entrevistas y encuestas de percepción.

- Hipótesis Cuantitativa: La implementación del Cuadro de Mando Integral (CMI) en BE Group reduce significativamente los indicadores de rotación y ausentismo laboral e incrementa la satisfacción del cliente en un 30% o más con base en las mediciones obtenidas a través de KPIs en Power BI y registros internos.

5. METODOLOGÍA

5.1 Enfoque

La investigación se desarrolló bajo un diseño descriptivo y aplicado, pues se centró en caracterizar la situación actual de BE Group en la gestión del capital humano y, a partir de dicho diagnóstico, proponer e implementar un modelo de mejora mediante el Cuadro de Mando Integral (CMI). El carácter descriptivo permitió identificar fenómenos clave como la rotación, el ausentismo y la ausencia de métricas de desempeño, mientras que el componente aplicado se reflejó en la creación de indicadores estratégicos, el diseño de mapas estratégicos y la implementación piloto del CMI en un cliente específico.

Adicionalmente, se adoptó un enfoque cualitativo, lo cual favoreció la interpretación de los datos obtenidos a través de encuestas de percepción, entrevistas con responsables de área y cuestionarios de clima organizacional. Este enfoque no solo aportó información numérica, sino también insumos narrativos y testimoniales que ayudaron a comprender de manera más profunda las causas detrás de los fenómenos observados, tales como la insatisfacción laboral o las dificultades de integración de los nuevos empleados.

5.2 Etapas

El proceso metodológico se estructuró en cuatro etapas principales, cada una con objetivos y actividades específicas que permitieron avanzar de manera sistemática desde el diagnóstico inicial hasta la evaluación de los resultados de la intervención.

Análisis contextual y diagnóstico interno–externo (Enero 2024).
En esta primera fase se llevó a cabo una revisión detallada del contexto de BE Group y de su cliente estratégico Yobel SCM.

Se recopilaron datos de ausentismo, rotación y desempeño a partir de fuentes como SUA, IMSS y bases internas, además de aplicar encuestas y entrevistas. Este análisis permitió identificar los principales problemas organizacionales y las limitaciones en la gestión del capital humano, estableciendo la línea base para el diseño del CMI.

Diseño de indicadores y objetivos del CMI (Febrero 2024). La segunda etapa se enfocó en la construcción del mapa estratégico del Cuadro de Mando Integral, definiendo objetivos alineados a las cuatro perspectivas (financiera, cliente, procesos internos, aprendizaje y crecimiento).

Adicionalmente, se identificó la cadena de valor de BE Group, que permitió estructurar los procesos calve en cada una de las cuatro perspectivas del CMI. A partir de este análisis, se elaboró un mapa estratégico (Figura 2), en el que se establecieron relaciones de causa-efecto entre los objetivos estratégicos mostrando como el aprendizaje y crecimiento del talento impulsa la mejora de procesos internos, lo que a su vez impacta en la satisfacción del cliente y, finalmente, en los resultados financieros.

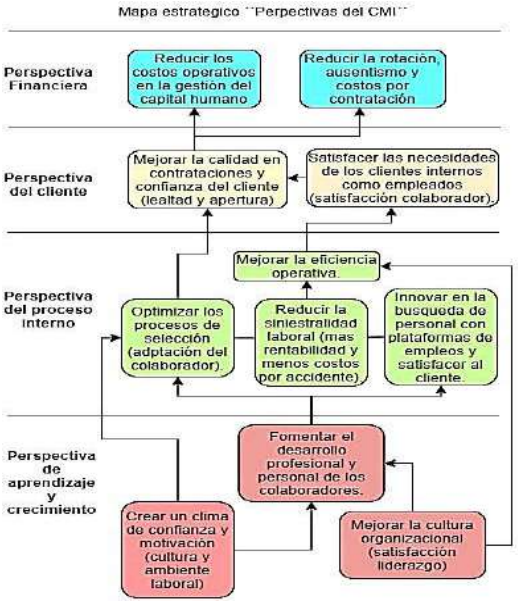


Figura 2. Mapa estratégico de CMI. Fuente: Elaboración propia

A partir de ellos se seleccionaron y diseñaron indicadores clave de desempeño (KPIs) específicos para el sector de servicios de capital humano. Esta fase fue fundamental para traducir la estrategia en métricas medibles y accionables, facilitando la gestión posterior mediante herramientas de monitoreo como Power BI.

Implementación piloto (Enero – Noviembre 2024). El piloto se aplicó directamente en la operación de Yobel SCM, cliente estratégico de BE Group. Durante once meses se recopilaron datos de rotación, ausentismo, satisfacción del cliente, clima organizacional y desempeño de procesos internos. La implementación incluyó sesiones de capacitación al personal, ajustes en la inducción y programas de bienestar. El seguimiento permitió validar la pertinencia de los indicadores, identificar áreas de mejora y realizar ajustes al CMI conforme avanzaba su ejecución.

Evaluación del impacto (Diciembre 2024). Finalmente, se efectuó una evaluación comparativa de los resultados obtenidos antes y después de la implementación. Se utilizaron indicadores de satisfacción del cliente, eficiencia operativa y clima laboral. Los resultados demostraron un incremento del 40% en la satisfacción del cliente, mejoras en los procesos internos y una mayor alineación estratégica, confirmando el valor del CMI como modelo replicable en empresas de servicios.

5.3 Instrumentos

La investigación empleó tres instrumentos principales:

- Encuestas (Likert).
- Entrevistas a responsables de área.
- Power BI para monitoreo y visualización de indicadores.

La combinación de estas herramientas facilitó un análisis integral, al unir datos objetivos con percepciones contextuales, y garantizó un monitoreo dinámico orientado a la toma de decisiones estratégicas.

6. RESULTADOS

El mapa estratégico (Figura 2) integro la cadena de valor con las cuatro perspectivas del CMI. En el se observa que el fortalecimiento del capital humano y el aprendizaje organizacional son impulsores de la eficiencia en procesos internos, lo cual repercute directamente en la satisfacción del cliente y en la sostenibilidad financiera de la empresa.

6.1 Perspectiva financiera

El análisis de la perspectiva financiera permitió identificar fluctuaciones significativas en los costos asociados a la rotación y el ausentismo laboral, factores que impactaban directamente la rentabilidad y la continuidad operativa en la cuenta estratégica de Yobel SCM.

A partir de los datos obtenidos del SUA, IMSS y movimientos de altas y bajas, se concluyó que la falta de programas de retención generaba costos adicionales recurrentes.

Como respuesta, se recomendaron estrategias de fidelización del talento, entrevistas de salida estructuradas y diagnósticos de clima laboral, lo que brindó información más precisa para comprender las causas de la rotación y orientar acciones preventivas. Estas medidas permitieron no solo controlar los costos, sino también proyectar escenarios financieros más estables para el cliente y para BE Group.

Figura 3. *Indicadores Rotación Operaciones perspectiva financiera. Fuente Elaboración propia*

Figura 4. Indicadores ausentismos Operaciones perspectiva financiera. Fuente Elaboración propia

6.2 Perspectiva del cliente

En la perspectiva del cliente, los resultados mostraron que existía una brecha importante en la experiencia de selección y reclutamiento, así como en los procesos de incorporación (onboarding). La implementación del CMI permitió monitorear indicadores relacionados con la satisfacción del cliente, obtenidos mediante encuestas y entrevistas, lo que evidenció la necesidad de optimizar la comunicación y el seguimiento a los nuevos empleados.

Como parte de las acciones derivadas, se diseñaron programas de desarrollo y bienestar laboral, además de fortalecer los protocolos de inducción, lo cual mejoró la integración de los trabajadores y generó mayor confianza en el cliente Yobel. Estos esfuerzos se reflejaron en un incremento notable en la percepción de calidad del servicio y en la lealtad del cliente hacia BE Group

Figura 5. Indicador índice Satisfacción del colaborador perspectiva del cliente. Fuente Elaboración propia

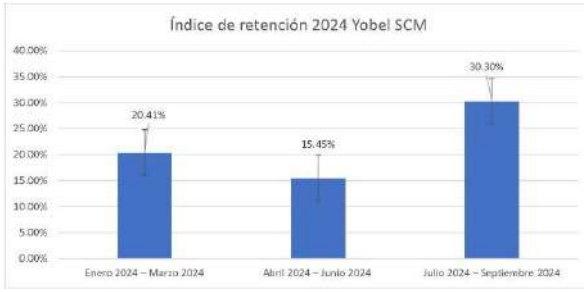


Figura 6. *Indicador índice de retención Yobel perspectiva del cliente. Fuente Elaboración propia*

6.3 Perspectiva de procesos internos

En relación con los procesos internos, el CMI reveló áreas críticas vinculadas a la salud y seguridad ocupacional, así como deficiencias en la adaptación de los nuevos empleados a sus roles. Los reportes internos y del IMSS indicaron que parte del ausentismo estaba relacionado con enfermedades laborales y condiciones ergonómicas inadecuadas.

Frente a esta situación, se implementaron programas de salud preventiva, campañas de vacunación, talleres de bienestar físico y mental y mejoras en las condiciones de trabajo. Estas acciones, sumadas a un seguimiento más cercano en la etapa de inducción, contribuyeron a reducir la incidencia de ausentismo y a elevar la integración de los trabajadores a la cultura organizacional, reforzando la productividad operativa.

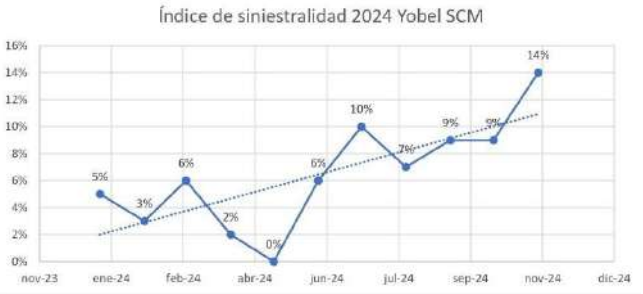


Figura 7. Indicador índice siniestralidad perspectiva procesos internos. Fuente Elaboración propia

Figura 8. Indicador índice adaptación del Nuevo Colaborador (IANE) perspectiva procesos internos. Fuente Elaboración propia

6.4 Perspectiva de aprendizaje y crecimiento

La perspectiva de aprendizaje y crecimiento se enfocó en la mejora de las capacidades organizacionales, particularmente en lo relativo a liderazgo, comunicación y reconocimiento al personal. Los resultados de encuestas internas reflejaron la necesidad de contar con líderes mejor capacitados y con canales de comunicación más abiertos y transparentes.

A partir de ello, se promovieron programas de formación en liderazgo situacional, gestión del desempeño y motivación, así como espacios para el reconocimiento de logros individuales y colectivos. Estas medidas fortalecieron la cultura organizacional, incrementaron la confianza de los colaboradores y generaron un ambiente más propicio para la innovación, la equidad y el crecimiento profesional dentro de BE Group.

Figura 9. Indicadores perspectiva aprendizaje y crecimiento

Fuente Elaboración propia

6.5 Impacto

El impacto global de la implementación del CMI fue relevante. Se registró un incremento del 40% en la satisfacción del cliente, evidenciado por los resultados de encuestas a Yobel, lo que confirmó la pertinencia de la herramienta en la gestión de cuentas estratégicas.

Asimismo, se alcanzó una mejora en la eficiencia operativa, al lograr que los procesos internos fueran más ágiles y alineados con los objetivos estratégicos definidos. Finalmente, se consolidó una mayor alineación entre la operación y la estrategia corporativa, lo que permitió a BE Group no solo responder de forma más efectiva a las demandas del cliente, sino también proyectarse como un modelo replicable en el sector de capital humano.

6.6 Benchmarking con métodos tradicionales

Con el propósito de evaluar de forma integral el impacto del Cuadro de Mando Integral (CMI) en la gestión de BE Group, se realizo un ejercicio de benchmarking frente a dos enfoques comúnmente empleados en el sector de servicios de capital humano:

1. Reporte operativo tradicional: basado en tableros descriptivos y reactivos, con indicadores dispersos y sin conexión entre áreas.
2. Modelo OKR (Objectives & Key Results), utilizado en una unidad de negocio homóloga, que carecía de mapa causa-efecto y de integración transversal de indicadores.

El protocolo de comparación

Tabla 1. Comparativo de desempeño por enfoque de gestion (periodos 2022-2024)

Método	Periodo de análisis	Rotación promedio (%)	Ausentismo (%)	Satisfacción del Cliente (%)	Comentarios
Reporte operativo tradicional Enero 2022 a Noviembre 2022	Ene–Nov 2022	38.5	9.8	0%	Métricas reactivas, sin trazabilidad.
OKR sin mapa causa Enero 2023 a Noviembre 2023	Ene–Nov 2023	38.7	10.7	>50%	Avances parciales, sin integración entre áreas.
CMI – BE Group (Power BI) Enero 2024 a Noviembre 2024	Ene–Nov 2024	24.91	7.45	84.0	Gestión predictiva y alineación estratégica consolidada.

Fuente: Elaboración propia con base en registros internos BE Group, SUA, IMSS y encuestas de satisfacción (Yobel SCM).

Los resultados demuestran que el CMI permitió reducir la rotación en un 13.59% y el ausentismo en un 2.5% respecto al modelo tradicional, además de incrementar la satisfacción del cliente en 40% puntos porcentuales.
Estas mejoras reflejan el efecto sinérgico del mapa causa-efecto y la disponibilidad de indicadores integrados, lo que fortalece la toma de decisiones y la eficiencia operativa.

6.7 Evidencia gráfica pre-post implementación

La figura 7 presenta la comparación visual de los indicadores de rotación, ausentismo y satisfacción del cliente antes y después de la implementación del CMI, con intervalos de confianza del 95% (IC95%) para mostrar la estabilidad de las mediciones mensual.

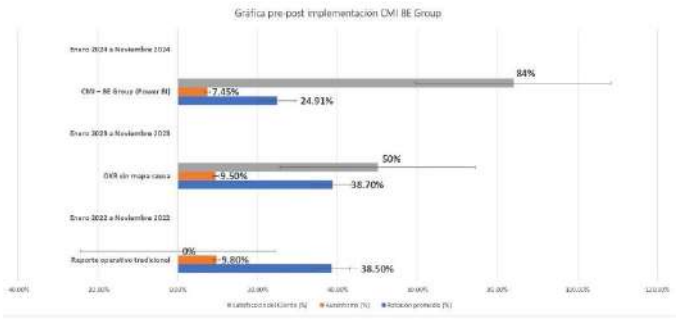


Figura 10. Comparativa pre-post implementación CMI BE Group

Fuente Elaboración propia

7. CONCLUSIONES

La implementación del Cuadro de Mando Integral (CMI) en BE Group permitió alinear sus operaciones con los objetivos estratégicos y transformar la gestión del capital humano en un proceso sustentado en métricas confiables. Con indicadores adaptados al sector de servicios, la empresa logró monitorear de manera más precisa fenómenos críticos como la rotación y el ausentismo laboral, fortaleciendo así la relación con clientes estratégicos y mejorando la calidad del servicio.

Los resultados obtenidos fueron significativos: se alcanzó un incremento del 40% en la satisfacción del cliente Yobel SCM, se optimizaron procesos internos y se integraron variables de clima laboral, cultura organizacional y liderazgo. Esto no solo impulsó la eficiencia operativa, sino que también fomentó una cultura organizacional más transparente, participativa y orientada a la mejora continua.

En conjunto, el proyecto demostró que el CMI trasciende su función de herramienta de control, al convertirse en un modelo de gestión integral y flexible, capaz de conectar la estrategia con la operación diaria. Su carácter replicable y adaptable a otros contextos, junto con el uso de tecnologías como Power BI, abre la posibilidad de escalarlo a nuevas áreas y consolidarlo como un referente en la gestión del talento dentro del sector de capital humano.

REFERENCIAS

Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1996). *El cuadro de mando integral: Traduciendo la estrategia en acción*. Boston: Harvard Business School Press.

Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (2014). *El cuadro de mando integral: The Balanced Scorecard*. Grupo Planeta, España.

Simonian, M. (2020). *Diseño y desarrollo de un cuadro de mando integral para la gestión de una empresa de servicios*. Universidad Católica de Córdoba.

Pedrini, J. H. (2024). Cuadro de mando integral: una aproximación exploratoria sobre su utilidad en las organizaciones. *Estudios de Ciencias Administrativas*, (24), 1-15. https://doi.org/10.52292/j.eca.2024.4272

Kumar, S., Lim, W. M., Sureka, R., et al. (2024). Cuadro de mando integral: tendencias, desarrollos y direcciones futuras. *Review of Managerial Science*, 18, 2397–2439. https://doi.org/10.1007/s11846-023-00700-6

.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Comparison of ferric salts in the solar photo-Fenton process for the treatment of wastewater from the textile industry

V. Díaz-Blancas [b] ,S. Y. Pinedo-Hernández [a,b]
[a]Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti), Av. Insurgentes Sur 1582, Col. Crédito Constructor, Demarcación Territorial Benito Juárez, CP 03940, México, (e-mail: samantha.ph@toluca.tecnm.mx)
[b]Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, CP 52149. Metepec, Estado de México, México,

Abstract: Currently, the textile industry generates large volumes of wastewater with high dye and chemical additive loads, exceeding regulatory limits and making its reuse difficult. Among the treatment alternatives, the solar photo-Fenton process has been consolidated as an efficient technique for the degradation of dyes and persistent organic compounds. In the present work, the application of the photo-Fenton process using three ferric salts ($FeCl_3$, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ and $Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$) was evaluated in textile wastewater from the industrial corridor of the Toluca Valley, State of Mexico. The initial characterization showed high values of COD (254 mg/L), total solids (375.6 mg/L) and conductivity (2761 µS/cm), compared to the maximum limits allowed by 001-SEMARNAT-2021. The results showed that the choice of salt makes a significant difference in the efficiency and final quality of the effluent. $FeCl_3$ achieved a COD reduction of up to 75%, along with a decrease in conductivity to 1294 µS/cm. However, hydrated and sulfated salts generated conductivity increases exceeding 4000 µS/cm, although they were most notable for color removal (>95%). Total solids removal was greater than 99% in all three treatments. Regarding process efficiency, decolorization percentages exceeding 80% were observed from the first 30 minutes of treatment, reaching up to 90% decolorization after 3 hours for the three coefficients considered in the standard.

Keywords: Solar photo-Fenton, Ferric salts, Textile wastewater, Chemical oxygen demand, Decolorization, Conductivity, Total solids

1.INTRODUCCIÓN

El agua es fundamental para la vida, ya que es crucial para la seguridad alimentaria. La severa escasez de agua es un asunto de preocupación a nivel global, debido al acelerado crecimiento demográfico y al aumento en los niveles de contaminación hídrica. Garantizar el abastecimiento de agua en condiciones óptimas de calidad se ha convertido en una tarea esencial en la actualidad (Zhang et al., 2019c). Entre los contaminantes de mayor preocupación se encuentran los colorantes, debido a la toxicidad asociada con su presencia en el ambiente y a su elevada resistencia a la degradación mediante los procesos convencionales empleados en el tratamiento de aguas residuales (Yaseen y Scholz, 2018). De acuerdo con cifras del Banco Mundial, entre el 17 % y el 20 % de las descargas industriales provienen de la industria textil. Los tintes utilizados en estos procesos presentan una alta estabilidad química, lo que favorece su persistencia en el ambiente. Esta acumulación afecta negativamente la fotosíntesis de las plantas acuáticas y promueve la proliferación de floraciones algales en cuerpos de agua, lo que altera los ecosistemas y pone en riesgo la vida de las especies acuáticas. (Pavithra et al.,2019). La incapacidad de las industrias textiles para administrar adecuadamente sus aguas residuales constituye uno de los desafíos más importantes que afecta a escala mundial (Ihsanullah et al., 2020). La industria textil representa una de las principales contribuciones a la economía global, pero al mismo tiempo constituye una fuente significativa de contaminación ambiental. La liberación de colorantes al entorno no solo deteriora la calidad ambiental, sino que también implica riesgos para la salud humana. Además, esta industria se caracteriza por generar grandes volúmenes de efluentes que contienen múltiples contaminantes persistentes (Manu, S. Chaudhari ,2023). En la actualidad se desarrollan numerosas investigaciones orientadas a la eliminación de colorantes en aguas residuales con el propósito de posibilitar su reúso. Los métodos convencionales empleados incluyen adsorción en carbón activado, coagulación-floculación, degradación biológica, procesos de oxidación e intercambio iónico; sin embargo, todos presentan limitaciones inherentes. Por ejemplo, la coagulación-floculación genera grandes volúmenes de lodos, lo que dificulta su manejo y disposición final (Vikrant et al.,2018).El proceso foto-Fenton solar es una técnica de oxidación avanzada aplicada con altas eficiencias en la decoloración de aguas residuales que contienen colorantes. Este proceso aprovecha la radiación solar incidente en la superficie terrestre para inducir reacciones de óxido-reducción, generando especies reactivas capaces de degradar compuestos orgánicos presentes en el efluente (Kumar, R et al., 2022a).El proceso de foto-Fenton se mejora utilizando radiación UV-vis o luz solar, que acelera la reducción de iones

Fe (III) a Fe (II), creando así una secuencia Fe (III) / Fe (II) en el proceso de foto-Fenton, además de fomentar la producción de radicales •OH (Ramírez-Moreno, J et al., 2024).El proceso de oxidación avanzada foto-Fenton (Fe y H_2O_2) utilizando luz solar es uno de los métodos que ha mostrado resultados prometedores donde se producen los radicales (•OH) (hidroxilo), capaces de oxidar una extensa variedad de compuestos orgánicos (Chimbolema et al, 2020). El objetivo de la presente investigación fue evaluar un proceso de oxidación avanzada mediante el uso de diferentes sales férricas y radiación solar para la fotodegradación de aguas residuales provenientes de una industria textil ubicada en el corredor industrial del Valle de Toluca, así como realizar la caracterización del efluente y determinar la eficiencia del proceso.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Muestreo

Las muestras de aguas residuales textiles se recolectaron al final del proceso de tratamiento, específicamente en el clarificador de una planta de efluentes perteneciente a una empresa del sector textil ubicada en el Estado de México. Durante el almacenamiento y transporte, las muestras se mantuvieron refrigeradas a una temperatura inferior a 4 °C con la finalidad de minimizar la degradación de los compuestos presentes. La caracterización inicial del efluente se realizó conforme a lo indicado en la Tabla 1, con el propósito de establecer las condiciones iniciales del efluente previo a su tratamiento.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Normatividad
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016
Sólidos Totales (ST) (mg/l)	NMX-AA-034-SCFI-2015
Conductividad (ppm)	NMX-AA-093-SCFI-2000
DQO (mg/L)	NMX-AA-030/2-SCFI-2011

2.2 Proceso foto-Fenton

La muestra de agua residual de la industria textil se colocó en un reactor de vidrio modelo *ChemReactor* bajo radiación solar (energía solar). Se aplicó un diseño experimental (ver Tabla 2), donde se establecieron 3 metodologías diferentes, cada una con una sal férrica diferente, las pruebas se llevaron a cabo bajo agitación constante a 120 rpm, con el fin de homogenizar la mezcla durante un periodo de 5 horas. La intensidad de la radiación solar fue registrada utilizando un luxómetro.

Tabla 2. Parámetros para el proceso foto-Fenton homogéneo sin ajuste de pH

Parámetro	Metodología 1	Metodología 3	Metodología 4
Dosis de catalizador	$FeCl_3$ (2.5g)	$FeCl_3.6\,H_2O$ (2.5g)	$(Fe_2(SO_4)_3 \cdot n\,H_2O)$ (2.5g)
Dosis de H_2O_2	20 ml	20 ml	20 ml
Dosis de agua textil	700 ml	700 ml	700 ml

2.2.1 Cuantificación del colorante

Para seguir la decoloración del agua residual, se empleó la técnica de espectrofotometría para determinar los coeficientes de absorción espectral a tres longitudes de onda dentro del espectro visible. De acuerdo con lo establecido en la norma NOM-001-SEMARNAT-2021, estos coeficientes deben evaluarse a 436, 525 y 620 nm, y los valores máximos permitidos para cada una de estas longitudes de onda son 7, 5 y 3 m^{-1}, respectivamente. El cálculo del coeficiente de absorción espectral, denotado como α(λ), se realiza utilizando la Ecuación 1, que expresa la absorción de luz por unidad de longitud de paso óptico. Los resultados deben reportarse conforme a lo indicado por la norma, en unidades de m^{-1}.

$$\alpha(\lambda) = \left(\frac{A}{d}\right) * f \ldots\ldots\ldots (1)$$

Donde A es la absorbancia de la muestra de agua a la longitud de onda, d es el paso de luz de la celda (longitud de la celda (mm)) y F es un factor utilizado para obtener el coeficiente espectral, en m-1 (f=1 000).

Para determinar el porcentaje de degradación, se utilizó la ecuación escrita más abajo. Se relaciona la absorbancia final de agua residual después del proceso con la absorbancia inicial del agua residual (ecuación 2).

$$\%\ Decoloración: \frac{A_f}{A_i} * 100 \ldots\ldots\ldots (2)$$

Donde Ai es la Absorbancia inicial y A_f es la absorbancia final tan sólo se tiene que sustituir los valores y así se determina el porcentaje de degradación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Determinación de los parámetros fisicoquímicos

La Tabla 3 presenta las características físicas y químicas del agua residual textil, se observan las condiciones típicas de este tipo de descargas industriales, que son consecuencia de la presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos propios de los procesos de teñido y acabado. Estos valores, al compararse con los límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, evidencian un incumplimiento en los parámetros de DQO y sólidos totales, lo que indica la necesidad de aplicar tecnologías de tratamiento más allá de las convencionales para poder descargar estos efluentes.

La conductividad inicial elevada es un indicador de la alta concentración de sales disueltas, que se pueden atribuir al empleo de colorantes y aditivos en los procesos textiles. Este parámetro implica un reto técnico para el tratamiento, ya que limita el potencial de reúso y plantea riesgos ambientales para los cuerpos receptores. Por lo tanto, la atención a este

indicador resulta esencial en la evaluación de la eficiencia de procesos avanzados como el foto-Fenton.

Tabla 3. Características físicas y químicas del agua residual textil

Parámetro	pH	Conductividad (µS/cm)	DQO (mg/L)	ST (mg/L)
Agua residual	8.3	2761	254	375.6
LMP*	6-9	--	150	50

pH: potencial de hidrógeno; conductividad: capacidad de conducción eléctrica; DQO: demanda química de oxígeno; ST: sólidos totales
* Límites Máximos Permitidos de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021

Los resultados de conductividad obtenidos tras el tratamiento con diferentes sales férricas se presentan en la Tabla 4 y muestran tendencias contrastantes. El uso de $FeCl_3$ generó una disminución significativa de la conductividad durante la primera hora de reacción, alcanzando un valor de 1810 µS/cm, esta reducción inicial puede relacionarse con la degradación parcial de los compuestos orgánicos y la posible formación de especies insolubles que precipitan, reduciendo la carga iónica. Sin embargo, con el avance del proceso, de forma general, se observaron incrementos posteriores, dando un valor de conductividad final de 1294 µS/cm. Este comportamiento sugiere la formación de intermediarios solubles durante la oxidación, que, aunque son de menor complejidad estructural, contribuyen a mantener la carga iónica en el sistema.

Por otro lado, los tratamientos con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ y $Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ mostraron de forma general un incremento en la conductividad, a lo largo del proceso, alcanzando valores cercanos a 4000 µS/cm al término del experimento. Este comportamiento puede explicarse por la naturaleza de los aniones acompañantes (cloruros y sulfatos), los cuales al liberarse en solución incrementan de manera directa la concentración de especies disueltas. Aunque, estos catalizadores demostraron eficacia en la generación del radical hidroxilo, lo que impactó en la decoloración del agua, el aumento de la conductividad es un aspecto desfavorable frente a criterios de descarga o reúso. Comparando las diferentes sales usadas, el empleo de $FeCl_3$ se proyectó como la opción más favorable en función de reducción de conductividad, mientras que las otras dos sales presentan la desventaja de introducir una mayor carga salina.

Tabla 4. Conductividad final usando tres sales

Parámetro	Conductividad (µS/cm) a	Conductividad (µS/cm) b	Conductividad (µS/cm) c
Agua residual	2761	2761	2761
1h	1810	4120	4131
2h	2033	2995	3007
3h	977	3218	3268
4h	1294	4025	4126

Conductividad; a) usando $FeCl_3$, b) usando $FeCl_3.6\ H_2O$, c) usando $(Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O)$

En la Tabla 5 se presentan los valores obtenidos para la DQO final usando tres sales. En la muestra inicial del efluente textil, la DQO fue de 254 mg/L, superando el límite máximo permitido (150 mg/L) establecido por la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas en cuerpos receptores. Este valor indica la presencia de una alta concentración de compuestos orgánicos persistentes característicos de la industria textil, especialmente colorantes, tensioactivos y agentes auxiliares.

Posterior a la aplicación del proceso foto-Fenton utilizando diferentes sales férricas: $FeCl_3$, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ y $Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$, se observaron comportamientos diferenciados en la evolución de la DQO (Tabla 5). En el caso de $FeCl_3$, la DQO mostró una reducción inicial significativa, alcanzando valores de 118 mg/L en la primera hora y 62 mg/L en la tercera hora, lo que representa una remoción de alrededor del 75 % respecto a la concentración inicial. Estos resultados indican una alta eficiencia en la generación de radicales hidroxilos (·OH) y, en consecuencia, en la degradación de contaminantes orgánicos. Sin embargo, en la cuarta hora se observó un repunte en la DQO (197 mg/L), lo que podría explicarse por una acumulación de subproductos intermedios de degradación que no fueron completamente mineralizados.

Con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, el desempeño fue menos consistente. Aunque inicialmente se observó una reducción a 118 mg/L, la DQO aumentó en horas posteriores, comportamiento similar en todas las cinéticas, alcanzando valores de 305–397 mg/L. Esto podría deberse a la liberación de aniones cloruro provenientes de la sal, los cuales pueden haber competido con los radicales hidroxilos, disminuyendo la eficiencia de la oxidación y favoreciendo la acumulación de intermediarios solubles (De Laat y Le, 2005). La generación de especies como $Cl\cdot$ o $Cl_2\cdot^-$ es conocida por reducir la capacidad oxidativa del sistema, lo cual explicaría el comportamiento observado.

El uso de $Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ mostró un patrón intermedio: la DQO descendió hasta 82 mg/L en la segunda hora, pero posteriormente aumentó hasta 103–115 mg/L hacia el final del proceso. En este caso, los iones sulfato no actúan como inhibidores directos, pero la acumulación de intermediarios parcialmente oxidados puede explicar la variación observada (Oturan y Aaron, 2014). Este comportamiento evidencia que, si bien el proceso es eficiente en etapas iniciales, el tiempo de reacción y las condiciones de operación juegan un papel crucial para evitar la formación de productos secundarios que incrementen la DQO.

La comparación entre catalizadores evidencia que el $FeCl_3$ anhidro fue el más efectivo en términos de reducción sostenida de DQO, con valores que en promedio se mantuvieron por debajo del límite normativo durante el proceso. En contraste, el $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ mostró limitaciones por el efecto inhibidor de los cloruros, mientras que el $Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ se comportó

como una alternativa intermedia, pero sin garantizar una reducción estable en el tiempo.

Estos resultados concuerdan con estudios previos que han documentado la eficacia del proceso foto-Fenton en la eliminación de DQO en aguas residuales textiles, alcanzando reducciones de entre 70 y 90 % bajo condiciones controladas (Pignatello *et al*., 2006). Sin embargo, también refuerzan la importancia de considerar los efectos de los aniones acompañantes, el tiempo y la acumulación de intermediarios en el diseño y optimización del proceso. Finalmente, para el caso de la DQO, los resultados demuestran que el proceso foto-Fenton solar tiene un alto potencial para reducir la carga orgánica de efluentes textiles, pero requiere un ajuste cuidadoso de los catalizadores y condiciones de reacción para evitar repuntes de DQO y garantizar la mineralización completa de los contaminantes.

Tabla 5. DQO final usando tres sales

Parámetro	DQO (mg/L) a	DQO (mg/L) b	DQO (mg/L) c
Agua residual	254		
1h	118	118	112
2h	249	249	82
3h	62	397	115
4h	197	305	103
LMP*			

DQO (Demanda Química de Oxigeno); a) usando $FeCl_3$, b) usando $FeCl_3.6\ H_2O$, c) usando $(Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O)$
LMP* Límites Máximos Permitidos de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021: 150

La Tabla 6 presenta Sólidos Totales del agua residual textil, los valores reportados superan el límite normativo (50 mg/L). La elevada concentración de sólidos disueltos y suspendidos se asocia con la presencia de colorantes, auxiliares y agentes del proceso de los textiles. Lo anterior, impacta en la turbidez del efluente y, en consecuencia, la penetración de la radiación solar en los procesos foto-Fenton, limitando la eficiencia de la reacción fotoquímica. Esta condición de alto contenido de sólidos no permite descargar de forma directa a cuerpos receptores sin tratamiento previo.

Tabla 6. Sólidos Totales del agua residual textil

Parámetro	ST (mg/L) a	ST (mg/L) b	ST (mg/L) c
Agua residual inicial	375.6	375.6	375.6
Término del proceso	0.085	0.099	0.076

ST (Solidos Totales): a) usando $FeCl_3$, b) usando $FeCl_3.6\ H_2O$, c) usando $(Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O)$
* Límites Máximos Permitidos de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-202

Después de a la aplicación del proceso foto-Fenton con diferentes sales férricas como catalizadores, los valores de ST finales disminuyeron de forma significativa hasta valores de 0.085 mg/L ($FeCl_3$), 0.099 mg/L ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) y 0.076 mg/L ($Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$). Esta reducción representa una eficiencia de remoción superior al 99 %, mostrando que el proceso no solo favoreció la degradación de contaminantes orgánicos, sino también la precipitación y/o transformación de compuestos sólidos en formas menos solubles. El comportamiento que se reporta concuerda con la naturaleza del proceso foto-Fenton, en el cual la generación de radicales hidroxilos (·OH) produce reacciones de oxidación que rompen moléculas complejas, lo que favorece la mineralización y la reducción de la materia disuelta (Pignatello *et al*., 2006). Además, la formación de hidróxidos de hierro durante el tratamiento puede haber contribuido a la coagulación y sedimentación de partículas suspendidas, lo que explica la disminución notable de sólidos totales (Oturan & Aaron, 2014).

Comparando las sales evaluadas, el empleo de $Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ alcanzó el valor más bajo de ST final (0.076 mg/L), ligeramente inferior al obtenido con $FeCl_3$ y $FeCl_3 \cdot 6H_2O$. Este resultado podría sugerir que los iones sulfato presentes actuaron como coadyuvantes en procesos de coagulación-precipitación, facilitando la eliminación de partículas y materia suspendida (De Laat y Le, 2005; Verma et al., 2012). Sin embargo, esta ventaja debe ser considerada cuidadosamente, ya que los mismos iones sulfato pueden contribuir a un aumento de la conductividad, limitando la calidad del agua para reúso. Considerando la normativa ambiental, la reducción de sólidos totales representa un beneficio significativo y permite la descarga del efluente a cuerpos de agua. La eliminación de ST reduce la turbidez y eso conlleva una mejora de la penetración de la radiación solar en el agua, lo que incrementa la eficiencia de procesos posteriores de oxidación o desinfección. También, disminuye los riesgos de sedimentación y alteración de hábitats acuáticos en cuerpos receptores, lo que se traduce en un menor impacto a los ecosistemas (Verma *et al*., 2012). Los valores de ST confirman que el proceso foto-Fenton solar es altamente eficaz en la reducción de sólidos en aguas residuales textiles. Sin embargo, es necesario evaluar de manera integral otros parámetros, como la conductividad, la DQO, el % de decoloración, entre otros, para garantizar que la disminución de sólidos no se acompañe de un incremento en la concentración de especies iónicas solubles, así como especies con toxicidad superior a sus precursoras, que comprometan la calidad final del efluente.

3.2 Proceso foto-Fenton

Los experimentos se realizaron en un reactor Bach, utilizando un diseño experimental en el que se varió la sal del catalizador. El sistema se mantuvo en agitación constante a 120 rpm durante 4 horas. La irradiación solar (energía solar) fue monitoreada mediante un luxómetro a lo largo del experimento. Posteriormente, se determinaron los coeficientes de absorción espectral conforme a lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7 para $FeCl_3$, Tabla 8 usando $FeCl_3.6\ H_2O$, y Tabla 9 usando $(Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O)$.

Tabla 7. Coeficiente Espectral del agua textil en presencia de H_2O_2 y exposición a la luz solar usando $FeCl_3$

Tiempo (h)	Coeficiente Espectral máximo			
	436nm (7 m^{-1})	525nm (5 m^{-1})	620nm (3 m^{-1})	LUX
0.5	5.16	2.74	1.98	2284
1.0	5.29	2.76	2.34	2388
1.5	4.57	1.79	0.85	2000
2.0	4.03	1.39	0.98	2436
2.5	4.50	0.51	0.56	2576
3.0	3.87	0.28	0.65	3078
3.5	4.51	0.73	0.43	3524
4.0	6.99	2.19	1.70	3671
Muestra Inicial	16.06	13.43	9.90	1408

Tabla 8. Coeficiente Espectral del agua textil en presencia de H_2O_2 y exposición a la luz solar usando $FeCl_3.6\ H_2O$

Tiempo (h)	Coeficiente Espectral máximo			
	436nm (7 m^{-1})	525nm (5 m^{-1})	620nm (3 m^{-1})	LUX
0.5	2.04	0.97	1.64	2284
1.0	1.53	6.45	1.19	2388
1.5	2.93	1.15	1.88	2000
2.0	0.50	1.07	0.50	2436
2.5	1.90	1.90	0.97	2576
3.0	1.76	0.36	0.80	3078
3.5	1.98	0.46	1.00	3524
4.0	2.37	0.65	1.03	3671
Muestra Inicial	18.70	10.74	8.43	1408

Tabla 9. Coeficiente Espectral del agua textil en presencia de H_2O_2 y exposición a la luz solar usando ($Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$)

Tiempo (h)	Coeficiente Espectral máximo			
	436nm (7 m^{-1})	525nm (5 m^{-1})	620nm (3 m^{-1})	LUX
0.5	4.76	2.44	2.18	1358
1.0	3.22	1.73	1.94	1403
1.5	4.14	2.00	2.02	1561
2.0	3.58	1.70	1.52	1596
2.5	3.10	1.76	1.92	1715
3.0	1.15	0.18	0.10	1845
3.5	1.01	1.10	0.07	2962
4.0	1.84	0.39	0.28	1537
Muestra Inicial	19.00	11.49	8.50	1133

El análisis comparativo de los tres catalizadores evaluados $FeCl_3$, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ y $Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ permite establecer diferencias significativas en cuanto a su eficiencia en la decoloración de efluentes y su cumplimiento con los parámetros establecidos por la normatividad mexicana. Los resultados obtenidos respecto al coeficiente de absorción indican que el empleo de $FeCl_3$ como catalizador genera valores significativamente bajos, lo que refleja una alta eficiencia en la remoción de color del efluente. En particular, se alcanzaron porcentajes de decoloración que oscilan entre el 75% y el 93% (Tabla 10) al cabo de tres horas de tratamiento. Asimismo, desde los primeros 30 minutos del proceso, se lograron reducciones superiores al 50%, lo que sugiere que la cinética del proceso es favorable y que el tratamiento con $FeCl_3$ es eficaz incluso en etapas tempranas. De acuerdo con los resultados obtenidos respecto al coeficiente de absorción, el uso de $FeCl_3$ permitió alcanzar valores bajos, lo que se traduce en una alta eficiencia en la remoción de color.

Tabla 10.: Decoloración del agua textil usando $FeCl_3$

Tiempo (h)	% Decoloración		
	436nm (7 m-1)	525nm (5 m-1)	620nm (3 m-1)
0.5	67.88	79.56	79.95
1.0	67.04	79.41	76.31
1.5	71.55	86,63	91.41
2.0	74.88	89.61	90.05
2.5	71.99	96.20	94.34
3.0	75.88	97.88	93.43
3.5	71.90	94.53	95.61
4.0	56.46	83.69	82.83

Por otra parte, al emplear $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ como agente coagulante, se registraron coeficientes espectrales dentro de los rangos establecidos por la normativa (Tabla 11). En lo que respecta a la eficiencia del proceso, se observaron porcentajes de decoloración superiores al 80% desde los primeros 30 minutos de tratamiento, alcanzando hasta un 90% de decoloración a las 3 horas para los tres coeficientes considerados en la norma. Esta comparación sugiere que ambos compuestos férricos presentan una eficiencia elevada en la remoción de color, aunque $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ muestra una ligera ventaja en cuanto al cumplimiento normativo temprano (desde los 30 minutos), probablemente debido a su mayor solubilidad y disponibilidad de especies activas en solución. No obstante, ambos catalizadores logran resultados satisfactorios en función de los parámetros establecidos, lo que los posiciona como alternativas viables para el tratamiento de aguas coloreadas.

Tabla 11.: Decoloración del agua textil usando $FeCl_3.6\ H_2O$

Tiempo (h)	% Decoloración		
	436nm (7 m^{-1})	525nm (5 m^{-1})	620nm (3 m^{-1})
0.5	80.06	90.92	80.55
1.0	91.82	39.94	85.88
1.5	84.33	89.25	77.64
2.0	97.33	89.99	94.07
2.5	89.84	83.31	88.49
3.0	90.56	96.60	90.51
3.5	89.39	95.72	88.14
4.0	87.30	93.95	87.52

Finalmente, el uso de $Fe_2(SO_4)_3{\cdot}nH_2O$ (sulfato férrico hidratado) resultó en los mayores porcentajes de decoloración, alcanzando valores entre el 93% y el 98% a las 3 horas de tratamiento. Este coagulante mostró un comportamiento decreciente sostenido desde los 30 minutos, lo que indica una remoción progresiva y eficiente del color desde las primeras etapas del proceso. En comparación con las otras sales evaluadas ($FeCl_3$ y $FeCl_3{\cdot}6H_2O$), el sulfato férrico demostró una cinética más estable y efectiva. Además, los coeficientes espectrales obtenidos al utilizar $Fe_2(SO_4)_3{\cdot}nH_2O$ se ubicaron dentro de los límites establecidos por la normatividad mexicana aplicable (ver Tabla 12), lo que refuerza su viabilidad como agente coagulante para el tratamiento de aguas residuales con alta carga de color. En conjunto, si bien los tres coagulantes cumplen con los objetivos del tratamiento, $Fe_2(SO_4)_3{\cdot}nH_2O$ se destaca por su mayor eficiencia y estabilidad en el proceso, siendo una alternativa preferente para aplicaciones en las que se requiere un alto grado de remoción de color cumpliendo con la normatividad vigente

Tabla 12.: Decoloración del agua textil usando ($Fe_2(SO_4)_3{\cdot}nH_2O$)

Tiempo (h)	% Decoloración		
	436nm (7 m-1)	525nm (5 m-1)	620nm (3 m-1)
0.5	74.93	78.76	74.35
1.0	83.03	84.90	77.12
1.5	78.22	85.59	76.24
2.0	81.14	85.20	82.12
2.5	83.66	84.68	77.35
3.0	93.95	91.43	98.82
3.5	94.64	91.21	99.98
4.0	90.32	96.91	96.95

La velocidad del proceso está directamente relacionada con la concentración de H_2O_2. A mayores cantidades de peróxido de hidrógeno, se incrementa la generación de radicales hidroxilos (•OH), lo que acelera la degradación de los contaminantes. Sin embargo, a partir de cierto umbral, un exceso de H_2O_2 puede provocar su autodescomposición, ya sea por descomposición directa o por reacción con los radicales •OH, lo cual reduce la eficiencia del proceso y puede afectar negativamente la velocidad de reacción. Asimismo, se pudo comprobar que la presencia de radiación solar fue un factor determinante para mejorar la eficiencia del proceso. La acción de la luz solar favoreció la generación de radicales •OH, lo que se tradujo en mayores porcentajes de decoloración en los tratamientos con los tres catalizadores férricos utilizados. La radiación ultravioleta es un factor clave en el proceso Foto-Fenton, en este caso nos permitió la activación del peróxido de hidrógeno y la regeneración del catalizador férrico. La eficiencia del proceso no depende únicamente de la intensidad y longitud de onda de la radiación, sino también de factores como la distribución de la luz dentro del reactor, debido a la reflexión de los rayos UV en las paredes del reactor, lo cual favorece una mejor distribución de la irradiancia en el volumen de agua tratado (Garcés-Porras, Karen, y Zavaleta Espinoza, Shiomara, 2024; Agudelo Valencia et al., 2020).

El aumento en la concentración del catalizador férrico, específicamente Fe^{2+}, incrementa la eficiencia del proceso Foto-Fenton, ya que favorece la producción de radicales hidroxilos (•OH), especies altamente reactivas responsables de la oxidación de los contaminantes. Sin embargo, esta mejora solo es efectiva hasta cierto punto, ya que concentraciones excesivamente altas de Fe^{2+} pueden limitar la eficiencia del sistema.

Cuando la concentración de Fe^{2+} es baja, la generación de radicales •OH también lo es, lo que reduce la eficacia del proceso. Al aumentar la cantidad de Fe^{2+}, se incrementa proporcionalmente la producción de •OH, mejorando la degradación de los compuestos presentes (Castrillón-Marín, Mateo, & Rubio-Clemente, Ainhoa, 2020).

4. CONCLUSIONES

Finalmente, el proceso foto-Fenton solar mostró un desempeño positivo en la mejora de parámetros indicadores de la calidad del agua como la decoloración y la reducción de DQO, sin embargo, los resultados en conductividad plantean un desafío, ya que no hay cumplimiento normativo y con ello las posibilidades de reúso no son viables.

El proceso foto-Fenton demostró que $FeCl_3$ es efectivo, pero puede tener limitaciones respecto al cumplimiento normativo, por su parte $FeCl_3{\cdot}6H_2O$ presenta un buen balance entre eficiencia y cumplimiento de normas; mientras que $Fe_2(SO_4)_3{\cdot}nH_2O$ es el más eficiente y cumple completamente con la normativa mexicana, siendo la opción más robusta para el tratamiento de aguas residuales en la industria textil mediante Foto-Fenton solar.

REFERENCIAS

Zhang, C., Chen, H., Xue, G., Liu, Y., Chen, S., Jia, C. (2019c). A critical review of the aniline transformation fate in azo dye wastewater treatment. Journal of Cleaner Production, 321,128971.

Yaseen, D.A. y Scholz, M. (2018). Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. International Journal of Environmental Science and Technology. 16.

Pavithra, KG, P., SK, V., J., y P., SR (2019). Eliminación de colorantes de aguas residuales: una revisión de las fuentes y las estrategias de tratamiento. Journal of Industrial and Engineering Chemistry.

Ihsanullah, I., Jamal, A., Ilyas, M., Zubair, M., Khan, G., & Atieh, M. A. (2020). Bioremediation of dyes: Current status and prospects. Journal of Water Process Engineering, 38, 101680.

Manu, S. Chaudhari (2023). Decolorization of indigo and azo dyes in semi continuous reactors with long hydraulic retention time, Process Biochem, vol. 38, pp. 1213–1221.

Vikrant, K., Giri, B. S., Raza, N., Roy, K., Kim, K. H., Rai, B. N., & Singh, R. S. (2018). Recent advancements in bioremediation of dye: current status and challenges. Bioresource Technology, 253, 355-367.

Kumar, R., Qureshi, M., Vishwakarma, D. K., Al-Ansari, N., Kuriqi, A., Elbeltagi, A., & Saraswat, A. (2022a). A review on emerging water contaminants and the application of sustainable removal technologies. Case Studies In Chemical And Environmental Engineering, 6, 100219

Ramírez-Moreno, J., Romo-Gómez, C., Camacho-López, C., Acevedo-Sandoval, O. A., Leyva-Morales, J. B., & González-Ramírez, C. A. (2024). Degradación de farmacéuticos y colorantes por foto-Fenton con luz solar. Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI, 12(24).

Chimbolema José Gerardo León, Medina Serrano Carlos Alcibar, Segovia Obando Evelyn Natalia. (2020). Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea: Dom, pp. 785-801.

Garcés-Porras, Karen, & Zavaleta Espinoza, Shiomara. (2024). Evaluación de la remoción de la materia orgánica de efluente de camal aplicando procesos Fenton y foto-Fenton. Revista internacional de contaminación ambiental, 40, 55100. Epub 17 de marzo de 2025.https://doi.org/10.20937/rica.55100

Agudelo Valencia, R. N. ., Ovalle González, D. P. ., y Rodriguez Rodriguez, L. F. . (2020). Aplicación de foto fenton (VIS) para la remoción de sulfuros y DQO en aguas residuales de curtiembre. Luna Azul, (50), 215–228. https://doi.org/10.17151/luaz.2020.50.1

Castrillón-Marín, Mateo, & Rubio-Clemente, Ainhoa. (2020). Optimización del proceso sono-foto-Fenton para el tratamiento de aguas residuales usando un diseño central compuesto. Producción + Limpia, 15(2), 24-45. Epub August 10, 2021.https://doi.org/10.22507/pml.v15n2a2

De Laat, J., & Le, T. G. (2005). Kinetics and modeling of the Fe(III)/H_2O_2 system in the presence of sulfate in acidic aqueous solutions. Environmental Science & Technology, 39(6), 1811–1818. https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es0493648

Oturan, M. A., & Aaron, J. J. (2014). Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: Principles and applications. A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 44(23), 2577–2641. https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829765

Pignatello, J. J., Oliveros, E., & MacKay, A. (2006). Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 36(1), 1–84. https://doi.org/10.1080/10643380500326564

De Laat, J., & Le, T. G. (2005). Kinetics and modeling of the Fe(III)/H_2O_2 system in the presence of sulfate in acidic aqueous solutions. Environmental Science & Technology, 39(6), 1811–1818. https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es0493648

Verma, A. K., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2012). A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. Journal of Environmental Management, 93(1), 154–168. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.012

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Evaluation of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Hydroponic Effluents as a Growth Medium for the Propagation of *Azolla* (Salviniaceae)

S. Santiago-Bravo*. A. Begines-García*, A. Mariana-Alvarado, G. Delgado-Lamas***, J.L. Rodríguez-Chávez****

**Centro Universitario Ceickor, Carretera Bernal, Acceso a Ezequiel Montes Km. 3, 76299,Colón, Querétaro, México*, (*Tel: 441-277-5050;* saul.santiago@centrouniversitarioceickor.edu.mx, alfonso.begines@centrouniversitarioceickor.edu.mx, jose.rodriguez@centrouniversitarioceickor.edu.mx)

***Universidad Autónoma de Querétaro, C.U. Cerro de las Campanas s/n, Cp. 76010, Querétaro, Querétaro, México.* (aurora.mariana.alvarado@uaq.mx)

****Instituto de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, C.U., 04510 Coyoacán, CDMX, México* (delgado@unam.mx)

Abstract: Open hydroponic systems generate drainage solutions that, when not recirculated, contribute to environmental contamination through nutrient and agrochemical leaching. This study evaluated the potential of *Azolla microphylla* as a strategy for the valorization of agricultural effluents derived from hydroponic tomato cultivation. The experiment was conducted under greenhouse conditions using a randomized design with three treatments and three replicates: T1 (drainage from organic tomato cultivation), T2 (drainage from conventional tomato cultivation), and T3 (standard nutrient solution as control). *A. microphylla* was grown for 20 days while monitoring physicochemical and biological parameters. The plant showed similar growth in all treatments, with a relative growth rate of 0.12 g/g/day and crude protein content between 18.3% and 19.4%. The study concludes that hydroponic tomato effluents provide enough nutrients to support the growth and biomass production of *A. microphylla*, demonstrating the feasibility of its cultivation in such effluents.

Keywords: Biofilter, Phytoremediation, Biomass, Crude protein, Hydroponic effluents, Nutrient recycling, Environmental sustainability, *Artemia salina*, DPPH assay, Water quality.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura protegida (AP) hace referencia a sistemas de producción agrícola bajo algún tipo de cubierta que proporcionan protección frente a las condiciones ambientales, con el objetivo de mejorar la productividad (Ortíz-Alamilla et al., 2023). En México, la AP pasó de 132 hectáreas en 2003 a más de 42,500 hectáreas en 2017, con presencia en los 32 estados del país desde 2018 (AMHPAC, 2018). Sin embargo, su adopción en México ha sido desigual, lo que ha provocado diferencias tecnológicas y pérdidas económicas (García-Herrera, Gómez-González y Hernández-Ríos, 2016).

El estado de Querétaro se ha consolidado como una de las regiones líderes en esta forma de producción. De acuerdo con el Censo Agropecuario 2022 (INEGI, 2022), en Querétaro existían 1,346 hectáreas destinadas a agricultura protegida, distribuidas en 384 unidades de producción, de las cuales el 60.2% correspondía a sistemas en invernadero. Solo en este sistema se generaron 69.4 mil toneladas de jitomate, uno de los principales cultivos bajo este esquema. Sin embargo, el crecimiento acelerado de este sistema de producción también ha tenido impactos socioambientales negativos (Ortíz-Alamilla et al., 2023).

Uno de los principales problemas asociados con la intensificación agrícola, particularmente en sistemas protegidos, es el uso excesivo de agroquímicos. La aplicación de grandes cantidades de fertilizantes y pesticidas ha provocado contaminación ambiental, alteraciones en las comunidades microbianas del suelo y cambios en la dinámica de las malezas (Reyes-Palomino y Cano, 2022).

Por otro lado, las prácticas de cultivo sin suelo, como la hidroponía, han aumentado a nivel mundial debido a su eficiencia en el uso de recursos y su capacidad para producir bajo condiciones controladas (Renganathan et al., 2024). Estos sistemas son valorados en regiones con disponibilidad limitada de recursos hídricos o suelos fértiles. Sin embargo, a pesar de sus ventajas productivas y tecnológicas, los sistemas hidropónicos enfrentan desafíos ambientales cuando no se gestionan adecuadamente. En México, donde el 77% del agua concesionada se destina a la agricultura (Salazar-Moreno, Rojano-Aguilar y López-Cruz, 2014), el uso intensivo de agua en sistemas protegidos representa una presión considerable sobre un recurso cada vez más escaso.

El manejo del agua de riego, y en particular del drenaje generado en cultivos protegidos, se ha convertido en un tema preocupante. Este drenaje puede representar hasta el 45% del

volumen de agua aplicada (de la Rosa-Rodríguez et al., 2018). Se ha reportado que el consumo hídrico promedio en cultivos bajo sistemas hidropónicos abiertos es entre 15 y 17% mayor que en sistemas cerrados, sin que ello se refleje en diferencias significativas en el rendimiento del cultivo (Abd-Elmoniem et al., 2006). Esta ineficiencia no solo representa un desperdicio económico, sino también un factor que agrava la presión ambiental, especialmente en regiones con escasez de agua.

Al no ser recirculados, tanto los fertilizantes como los agroquímicos presentes en la solución nutritiva drenada pueden alcanzar cuerpos de agua superficiales, acuíferos o incluso plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (Benoit y Ceustermans, 1995). Esta contaminación difusa puede afectar la calidad del agua y contribuir a la salinización del suelo, especialmente en zonas áridas y semiáridas (Carbonell-Mestre et al., 2021; Loor et al., 2019; Minhas et al., 2020). Los nutrientes liberados en cuerpos de agua favorecen procesos de eutrofización, caracterizados por el crecimiento excesivo de fitoplancton y cianobacterias. Esta proliferación, a su vez, reduce los niveles de oxígeno disuelto y puede provocar la formación de zonas muertas debido a la hipoxia (Pedrozo y Ramírez, 2020).

Azolla es un género de plantas acuáticas de la familia Salviniaceae, con especies distribuidas en ecosistemas de agua dulce de regiones templadas y tropicales del mundo (Mosha, 2018). De acuerdo con la plataforma World Flora Online (WFO), el género *Azolla* incluye un total de 26 especies, de las cuales 6 (23%) son especies aceptadas, 17 (65%) son sinónimos y 3 (12%) corresponden a especies sin ubicar (WFO, 2025). Más allá de su interés botánico, *Azolla* ha captado la atención por su notable potencial en diversas aplicaciones agroambientales. Una de las características más destacadas de *Azolla* es su capacidad para establecer asociaciones simbióticas con cianobacterias fijadoras de nitrógeno, lo cual la convierte en una fuente de este nutriente esencial en la agricultura. En condiciones óptimas, puede aportar hasta 1200 kg de nitrógeno por hectárea (Adhikari, 2020). Esta hidrófita, además, presenta una alta tasa de crecimiento, una producción significativa de biomasa y un perfil nutricional completo que incluye aminoácidos esenciales, minerales (como hierro, calcio, magnesio, potasio, fósforo, manganeso) y vitaminas como B12 y antioxidantes como β-caroteno (Katole et al., 2017). Especies como *Azolla microphylla* y *A. filiculoides* han sido aprovechadas con fines medicinales, así como en la producción de biocombustibles renovables, gracias a su alta tasa de crecimiento y considerable producción de biomasa. En particular, *Azolla microphylla* se encuentra presente en el estado de Querétaro, donde su aprovechamiento representa una oportunidad significativa para el desarrollo de tecnologías ambientales y productivas sostenibles (Lobato-de Magalhães y Martínez, 2018). Su importancia se refuerza por su capacidad para actuar como biofiltro eficaz en el tratamiento de aguas residuales. Se ha observado que *Azolla* tiene una alta capacidad de adsorción de metales pesados, particularmente en condiciones de alta concentración. En estudios donde la concentración de plomo (Pb) en el agua fue de 50 ppm, *Azolla* logró una eficiencia de adsorción del 100% (Rivera et al., 2017). *Azolla filiculoides* ha sido empleada para remover contaminantes incluyendo fluoruro, amonio, colorantes, demanda química de oxígeno, nitrógeno, fósforo y metales, la remoción de compuestos orgánicos como bisfenol A(BPA) de soluciones varía entre el 60 y el 90%. Esta eficacia depende tanto de la concentración del contaminante como de la cantidad de biomasa utilizada (Taghilou et al., 2023). Benguennouna et al. (2025), mencionan que *Azolla microphylla* mejora de la calidad del agua residual, reduciendo significativamente la DQO (94.9 %), DBO_5 (89 %) y los SST (más del 93 %). También disminuye las concentraciones de metales pesados como Pb, Cd, Cu, Zn, Fe y Mn en un rango del 76 % al 85 %. Estas propiedades de remoción se deben, en parte, a la composición de su pared celular, particularmente rica en pectina, lo que le permite funcionar como agente adsorbente de sustancias tóxicas presentes en el agua (Mendoza-Retana, 2021). Estudios previos han mostrado que el uso de agua residual puede incluso estimular el crecimiento de *Azolla* en comparación con aguas limpias o destiladas, con incrementos de biomasa superiores al 130% (Nordiah et al., 2012). Esta capacidad de adaptación y utilidad convierte a *Azolla* en una opción en iniciativas de sostenibilidad y economía circular. En este marco, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de efluentes del cultivo hidropónico de *S. lycopersicum* en la propagación de *Azolla* como estrategia de revalorización de efluentes agrícolas y producción de biomasa vegetal útil para fines agrícolas, alimentarios o ambientales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Material biológico

Se utilizó *A. microphylla* (*syn Azolla cristata* Kaulf.), donada por el herbario de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma de Querétaro.

2.2 Medio de cultivo

Como medios de cultivos se utilizaron soluciones drenadas del cultivo hidropónico de tomate (orgánico y convencional), cultivado en invernaderos de mediana tecnología en el municipio de Colón, Querétaro, y solución nutritiva con la siguiente composición (mg/L): $5Ca(NO_3)_2{\cdot}NH_4NO_3{\cdot}10H_2O$ (259.2); $CaCl2{\cdot}2H_2O$ (288.6); K_2SO_4 (8.178); KH_2PO_4 (170); KNO_3 (545.4); $Mg(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ (256); $Mg(SO_4){\cdot}7H_2O$ (49.938).

2.3 Adaptación

En 12 L de solución nutritiva se disolvieron 200 g de suelo, la solución resultante se filtró a través de una malla para eliminar el material suspendido. La solución de suelo se colocó en un recipiente plástico de 40 cm de diámetro, 12 cm de alto y un volumen estimado de 15 L. El recipiente con la solución nutritiva se colocó dentro del invernadero. Una muestra inicial de 20 gramos de *A. microphylla* se colocó en el recipiente con la solución y se permitió su adaptación y crecimiento durante dos semanas.

2.4 Propagación

Se transfirieron 8 g de *A. microphylla*, previamente adaptada, a un recipiente rectangular de plástico, de 35 cm de ancho, 45 cm de largo y 12cm de profundidad con 10L de solución de

drenaje de cultivo hidropónico de tomate o el mismo volumen de solución nutritiva (orgánico o convencional). Esta actividad se realizó por triplicado. Los recipientes con la siembra se mantuvieron durante 21 días dentro el invernadero para permitir el crecimiento y desarrollo de *Azolla* (figura 1). Los valores de conductividad eléctrica y pH de las soluciones fueron determinados cada tercer día utilizando un potenciómetro (HANNA, E.U). El contenido de elementos nutritivos de las soluciones de drenaje se determinó en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental de la UNAM, campus Juriquilla. Después de 21 días de crecimiento, se recolectaron las plantas de *A. microphylla* con una red. El material cosechado se dejó secar hasta peso constante.

2.5 Tasa relativa de crecimiento

El material seco se pesó en una balanza y la tasa relativa de crecimiento se calculó con la ecuación descrita por Zarate-Cruz et al. (2016):

$$TRC = \frac{[Ln_{pf} - Ln_{pi}]}{\Delta t}$$

Dónde: Ln_{pi} es el logaritmo natural del peso inicial, Ln_{pf} es el logaritmo natural del peso final, Δt es período de cultivo.

2.6 Determinación de actividad reductora de 2,2-difenil-1-picrilhidracil (DPPH)

La evaluación de la actividad reductora de DPPH se llevó a cabo en el Laboratorio de Pruebas biológicas del Instituto de Química de la UNAM. Un gramo de planta seca se colocó en un matraz Erlenmeyer de 50 mL, posteriormente se agregaron 30 mL acetona. A las 24 horas se filtró el sobrenadante y el residuo fue cubierto nuevamente con 30 mL de acetona, esta operación se realizó tres veces consecutivas, en cada una de las cuales el tiempo de maceración fue de 24 horas. Al final se reunieron los sobrenadantes y el líquido se concentró a presión reducida en un rotoevaporador (Büchi, Suiza). El residuo seco se utilizó para evaluar la actividad reductora de DPPH. El bioensayo se llevó acabo de acuerdo con la metodología propuesta por Blois. Se preparó una solución a partir del extracto, disolviendo una muestra en DMSO. Se añadieron 0.05ml del extracto a diferentes concentraciones a una solución etanólica de DPPH (100 μM, 2.95mL). Al control sólo agua destilada. Después de la incubación durante 20 min a temperatura ambiente y en la oscuridad se registró la absorbancia a 517nm. La capacidad reductora se calculó como el porcentaje (%) de DFPH depurado, calculado como:

$$\frac{[(DO\ de\ control - DO\ del\ compuesto)}{(DO\ del\ control)\ x\ 100]}$$

El α -tocoferol se utilizó como estándar.

2.8 Efecto de los efluentes en Artemia salina

Los quistes se obtuvieron de una tienda local y se eclosionaron en placas de Petri con agua de mar artificial (3.7 % p/v sales marinas disuelto en agua desionizada a pH 8) y se incubaron a 25 ± 1° C durante 48 h. Posteriormente las larvas recién nacidas fueron separadas de sus cáscaras y los quistes restantes transfieriéndose a agua de mar recién preparada. Los ensayos de toxicidad se realizaron en una placa de 96 pozos (Corning, NY, EE.UU.). La solución se colocó en los pozos de la placa. El dicromato K_2Cr2O_7, empleado como control positivo, se preparó en concentraciones de 1, 10 y 100 μM. Se utilizaron pozos a los que solamente se agregó el vehículo como controles negativos. El porcentaje de mortalidad de las larvas (%) se determinó 24 h después de la exposición. El porcentaje de mortalidad se calculó de acuerdo con el método de Reed-Muench (1938), considerándose como muertas las larvas con ausencia de movimiento hacia adelante. La CL_{50} se determinó empleando análisis probit.

2.9 Contenido de proteína

La determinación del contenido de proteína cruda calculada como N*6.25, se realizó en el Laboratorio de Nutrición Animal de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma de Querétaro, de acuerdo a lo establecido en el método de la Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2023).

2.10 Diseño experimetal

Se evaluaron tres tratamientos cada uno con tres repeticiones. T_1 consistente en solución drenada de cultivo orgánico de tomate y T_2 consistente en solución drenada de cultivo convencional de tomate y como control (T_3) una solución nutritiva.

2.11 Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados utilizando el paquete estadístico GraphPad Prism versión 10.0 (GraphPad Software, Boston, MA).

3. RESULTADOS

3.1 Efecto de las soluciones de drenaje en A. salina

Se realizó el bioensayo con *A. salina* para evaluar el posible efecto tóxico de los efluentes hidropónicos sobre organismos acuáticos. El uso de *A. salina* como bioindicador de ecotoxicidad es útil para valorar el riesgo ambiental asociado al vertido de efluentes agrícolas en ecosistemas acuáticos (Hernández, 2017). Los ensayos de toxicidad aguda con *A. salina* mostraron un comportamiento dependiente de la concentración. En particular, la solución nutritiva generó una mortalidad del 18.18% cuando se aplicó en su concentración original (100%), mientras que la solución de drenaje del cultivo orgánico mostró una menor toxicidad, con una letalidad del 9.38% a la misma concentración. Estos valores se consideran indicativos de un efecto tóxico moderado. Sin embargo, la solución de drenaje procedente del cultivo convencional presentó un efecto más pronunciado, alcanzando un 50% de mortalidad en larvas expuestas a la solución sin diluir. Al reducir la concentración de las soluciones, se observó una disminución en los niveles de letalidad. Con una dilución al 10%, la mortalidad se redujo al 5.26% para la solución nutritiva convencional, 3.29% en la solución de drenaje de cultivo orgánico y 2.13% en la solución de drenaje convencional. En las soluciones al 1%, los efectos tóxicos fueron prácticamente nulos: 0% de mortalidad en la solución nutritiva, 1.15% en la solución de drenaje orgánico y 1.32% en

la solución de drenaje convencional. Estos resultados reflejan la atenuación del efecto tóxico a medida que disminuye la concentración, relevante desde el punto de vista ambiental, dado que en condiciones reales estas aguas suelen diluirse al ingresar en cuerpos de agua, lo que reduce su impacto ecológico potencial.

3.2 Producción de biomasa

En sistemas hidropónicos abiertos, las soluciones drenadas ricas en fertilizantes pueden causar la pérdida de nutrientes valiosos como fósforo y nitrógeno. El cultivo de *Azolla* puede reducir la concentración de nutrientes en el agua (Vroom et al., 2024), disminuyendo el riesgo de eutrofización en cuerpos receptores. En el experimento *Azolla* mostró una adecuada adaptación a las condiciones del invernadero, retomando su crecimiento a medida que el clima se volvió más favorable (Figura 1). Según Carrapico (2010), el ecotipo flotante de *Azolla* crece en cuerpos de agua dulce, con raíces libres y desarrollo horizontal. En lo referente a peso seco, después de 21 días, el material obtenido fue de 104.63 ± 7 g en solución nutritiva, 103.67 ± 5.7 g. en solución de drenaje convencional y 104.3 ± 21 g en solución drenada del cultivo orgánico y 102 ± 14.17 g (Figura 2). El análisis de estadístico indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (P= 0.9053).

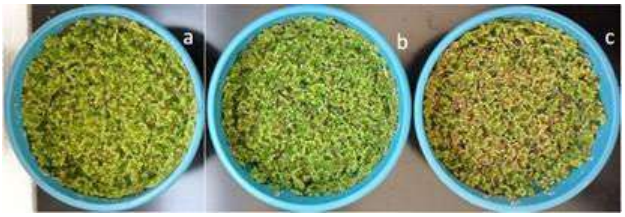


Figura 1. Manto flotante de *A. mycrophilla* en la superficie del agua

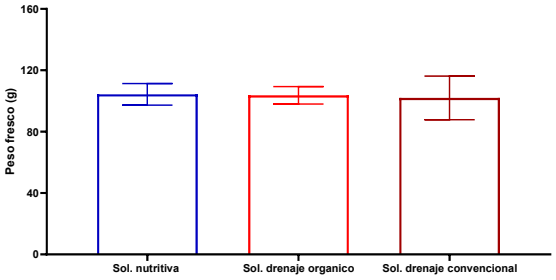


Figura 2. Producción de biomasa en diferentes soluciones

3.3 CE y pH de la solución de cultivo

Durante el desarrollo del experimento, se observó un incremento progresivo en los valores de conductividad eléctrica (CE), tanto en la solución nutritiva como en la solución de drenaje del cultivo convencional, asociado a un aumento en la concentración de sales solubles presentes en el sistema. La CE de la solución de drenaje fue aproximadamente dos unidades por encima de la CE de la solución nutritiva (Figura 3). Este comportamiento ascendente puede atribuirse, en parte, a la falta de reposición del agua evaporada durante las primeras etapas del experimento. El aumento en la concentración de sales podría estar asociado con el bajo rendimiento observado en el cultivo. La salinidad no sólo afecta la tasa de crecimiento, sino que también desencadena respuestas fenotípicas al estrés salino (Katole, 2017). Los valores de pH en la solución de cultivo convencional fluctuaron entre 5.2 al inicio del experimento y 6.8 al finalizar los 21 días. Estos valores se encuentran dentro del rango de tolerancia para *Azolla,* y son consistentes con los reportados por Ferentinos, Smith y Valenzuela (2022) y Sadeghi et al. (2024), quienes indican que el crecimiento óptimo ocurre cuando el pH de la solución se encuentra entre 4.5 y 7, aunque la planta puede sobrevivir en un rango más amplio de 3.5 a 10, siempre que se mantenga la disponibilidad de nutrientes esenciales. Katole (2017) por su parte, propone un rango más estrecho de 5.3 a 5.8 como el más adecuado para un crecimiento óptimo. Por su parte, Tarif (2021) señala que valores inferiores a pH 3.5 no son adecuados para el desarrollo de *Azolla*, además de establecer una temperatura mínima de tolerancia al frío de -5 °C, siendo 18-28 °C el intervalo ideal para la mayoría de las especies.

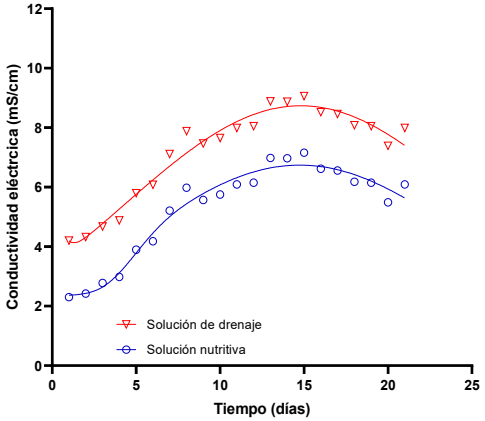


Figura 3. Valores de CE de la solución de cultivo en función del tiempo

3.4 Tasa relativa de crecimiento

La tasa relativa de crecimiento (TRC), entendida como la ganancia de biomasa por unidad de biomasa y tiempo (García et al., 2018), se utilizó como indicador clave para evaluar el comportamiento fisiológico de *A. microphylla* bajo diferentes condiciones de cultivo. En el presente estudio, *A. microphylla* mostró un comportamiento de crecimiento similar en los tres tratamientos evaluados: solución nutritiva, solución de drenaje convencional y solución de drenaje procedente de cultivo orgánico. Las TRC obtenidas fueron de 0.12 ± 0.1 g/día, 0.12 ± 0.2 g/día y 0.12 ± 0.03 g/día, respectivamente. Asimismo, el tiempo de duplicación de la biomasa fue prácticamente equivalente entre tratamientos, con valores de 5.7, 5.6 y 5.5 días, respectivamente. Este comportamiento sugiere que las soluciones de drenaje, incluso aquellas derivadas de cultivos orgánicos, contienen nutrientes en concentraciones suficientes para sustentar un desarrollo vigoroso de *A. microphylla*.

La similitud observada en la tasa de crecimiento entre los tratamientos permite inferir que no hubo deficiencia crítica de fósforo, nutriente cuya ausencia puede restringir de forma significativa el desarrollo de *Azolla* (Ferentinos, Smith y Valenzuela, 2002). Como se ha reportado previamente, luego de una breve etapa de adaptación, *Azolla* entra en una fase de crecimiento exponencial, un fenómeno que ha sido relacionado con mecanismos de *quorum sensing* entre individuos, facilitando una respuesta fisiológica colectiva favorable bajo condiciones adecuadas (da Silva, 2022). Los tiempos de duplicación obtenidos en este estudio se encuentran dentro del rango reportado en la literatura para *Azolla.* (3 a 16 días), conforme a lo señalado por Huetio y Cuervo (2009). De manera similar, Nordiah et al. (2012) observaron un incremento de la tasa de crecimiento diaria al comparar el cultivo en agua destilada (3.61%) frente al agua de drenaje (19.04%), resaltando la capacidad de esta planta para aprovechar los nutrientes presentes en aguas residuales agrícolas. Rivera et al. (2017) mencionan que *Azolla* puede equilibrar las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono en ambientes controlados. Además, esta planta se adapta bien a condiciones de salinidad y contaminación, desarrollándose adecuadamente en medios con pH ligeramente ácido y salinidad media. De acuerdo con los investigadores, la mayor producción de biomasa se logra en columnas de agua sin techo, con un crecimiento rápido y eficiente bajo diferentes condiciones climáticas. El crecimiento rápido, alta producción de biomasa, sistema radicular moderadamente extenso, facilidad de cosecha y tolerancia a una amplia gama de metales pesados son características ideales que reúne *Azolla* características para la fitorremediación. La biomasa generada durante la fitorremediación puede aprovecharse para la producción de bioenergía. Además, el residuo posterior puede utilizarse como forraje rico en proteínas para animales o como abono verde (Sood et al., 2011).

3.5 Gasto de agua

Durante el experimento, se reconstituyó el volumen inicial de 10 L en cada contenedor cuatro veces en dos semanas, evidenciando un gasto significativo de agua. La pérdida diaria promedio fue de 278.09 mL en la solución nutritiva y de 329.52 mL en la solución de drenaje, disminuyendo progresivamente el volumen disponible (Figura 4). Esta pérdida provocó una concentración de sales, afectando negativamente el crecimiento de *Azolla*. El tratamiento control, con mayor cobertura vegetal, redujo la evaporación al proteger la superficie del agua, manteniendo profundidades entre 7.8 y 9.5 cm. Las temperaturas crecientes también incrementaron la evaporación. Se ha observado que profundidades entre 9 y 15 cm favorecen el desarrollo radicular Adzman et al. (2022).

3.6 Reducción de 2,2-difenil-1-picrilhidracil (DPPH)

En estudios previos, se ha demostrado que *Azolla microphylla* posee un potencial cardioprotector, el cual se atribuye a su destacada actividad antioxidante y capacidad para neutralizar radicales libres (Bhaskaran y Kannappan, 2017). Sin embargo, en este estudio en ninguno de los casos el porcentaje de reducción fue de al menos el 50%, lo que indica que la capacidad antioxidante de los extractos evaluados es baja o moderadamente débil. El ensayo DPPH es una técnica ampliamente utilizada para medir la actividad antioxidante y comúnmente se considera que un porcentaje de reducción superior al 50% refleja una actividad antioxidante significativa.

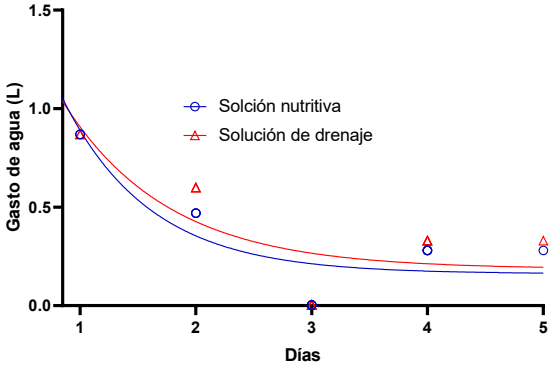


Figura 4. Gasto de agua en un periodo de 2 semanas

3.7 Contenido de proteína cruda

El contenido promedio de proteína cruda (N×6.25) en las muestras de *A. microphylla* fue de 19.36%, 18.51% y 18.31% para los cultivos en solución nutritiva, solución drenada del cultivo orgánico y solución drenada del cultivo convencional, respectivamente. A pesar de las ligeras variaciones entre tratamientos, no se observaron diferencias significativas en el contenido de proteína cruda entre los diferentes tipos de solución utilizados. *A. microphylla* suele presentar un contenido proteico más elevado. Se han documentado valores de hasta 31.3% de proteína cruda (Kamaruddin, Abdul y Ahmad, 2021; Winstead et al., 2024). Estas diferencias pueden deberse a las condiciones de cultivo, el tipo y concentración de nutrientes, la etapa de cosecha, las prácticas agronómicas, y la variabilidad genética de las cepas utilizadas. Sin embargo, el hecho de que no se detectaran diferencias significativas entre tratamientos sugiere que el tipo de solución empleada no tuvo un efecto en la síntesis proteica. Méndez-Martínez et al. (2017), mencionan que el contenido de proteína cruda y aminoácidos esenciales, además de su buena aceptación y digestibilidad convierte a *Azolla* en un suplemento eficiente y nutritivo. por ello es utilizada para elaborar dietas para peces, aves, cerdos y camarones, ya sea fresca o seca.

4. CONCLUSIONES

Azolla microphylla un crecimiento eficaz en soluciones de drenaje de cultivos hidropónicos de tomate, indicando que estos efluentes contienen nutrientes suficientes para su desarrollo. Su uso permite reciclar nutrientes, reducir la contaminación y generar biomasa con potencial como biofertilizante, forraje o biocombustible. La implementación de esta estrategia puede mejorar la sostenibilidad ambiental de la agricultura protegida, y su aplicación podría ampliarse a otros sistemas y tipos de efluentes en futuras investigaciones.

5. REFERENCIAS

Abd-Elmoniem, E. M., Abdrabbo, M. A., Farag, A. A., and Medany, M. A. (2006). Hydroponics for food production: comparison of open and closed systems on yield and consumption of water and nutrient. In *2nd International Conference on Water Resources and Arid Environments.* Riyadh, Saudi Arabia: King Saud University (pp. 1-8).

Adhikari, K., Bhandari, S. and Acharya, S. (2020). An overview of *Azolla in* rice production: a Review. *Reviews In Food and Agriculture*, 2(1), 4-8.

Adzman, N., Kumarunddin, M., Alam, M., and Johari, A. (2022). Preliminary study on Azolla cultivation and characterization for sustainable biomass source. *Journal of Physics: Conference series,* 2259(1).

Asociación Mexicana de Horticultura Protegida A.C. (2018). Horticultura protegida en México. http://amhpac.org/2018/images/PDFoficial/HorticulturaenMexico.pdf

Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2023). Official Method 984.13. Protein (Crude) in animal feed and pet food: copper catalyst Kjeldahl Method. 22th ed. Oxford University Press, Washington (DC).

Bhaskaran, S. K., and Kannappan, P. (2017). Protective effect of *Azolla microphylla* on biochemical, histopathological and molecular changes induced by isoproterenol in rats. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 89, 473-481.

Benoit, F.,and Ceustermans, N. (1994). Horticultural aspects of ecological soilless growing methods. *Hydroponics and Transplant Production,* 396, 11-24.

Benguennouna, N., Benabdelmoumene, D., Dahmouni, S., Bengharbi, Z., Qadi, W. S., Hamezah, H. S., and Mediani, A. (2025). Eco-phytoremediation using *Azolla microphylla* enhances heavy metal removal, water quality, and biomass valorization in semi-arid wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 101437.

Carbonell-Mestre, T., Blanco-Imbert, A., Herrera-Puebla, J., Chaterlán-Durruthy, Y., Herrera–Sardiñas, L. M., Cintra-Arenciaba, M., Ricardo-Calzadilla, M.P. y Márquez -Calavia J. A. (2022). Influencia del riego en cultivos sobre el manto freático de un suelo aluvial de Guantánamo. *Ingeniería Agrícola*, 12(1), -Calavia.

Carrapiço, F. (2010). *Azolla* as a superorganism. Its implication in symbiotic studies. In *Symbioses and stress: Joint ventures in biology* (pp. 225-241). Dordrecht: Springer Netherlands.

De la Rosa-Rodríguez, R. D. L., Lara-Herrera, A., Trejo-Téllez, L. I., Padilla-Bernal, L. E., Solis-Sánchez, L. O., and Ortiz-Rodríguez, J. M. (2020). Water and fertilizers use efficiency in two hydroponic systems for tomato production. *Horticultura Brasileira*, 38, 47-52.

da Silva, M.E., Joy, L.O., van Rooyen, I.L., Brink, H.G., y Nicol, W. (2022). Optimal growth conditions for Azolla pinnata R. Brown: impacts of light intensity, nitrogen addition, pH control, and humidity. *Plants*, 11, 1048.

Ferentinos, L., Smith, J. y Valenzuela, H. (2002). Green Manure Crops: *Azolla. College of Tropical Agriculture and Human Resources*, University of Hawai'i at Mānoa. SA-GM-2.

García, C.K.D., Romo-Campos, R. D. L., Pereira, C.J., y Gómez-Rubio, R. (2018). Tasa relativa de crecimiento en plántulas de dos poblaciones de *Magnolia pugana* (Magnoliaceae) en distintos niveles de luz y fertilidad del suelo. *Revista de Biología Tropical,* 66(2), 622-633.

García-Herrera, E. J. Gómez-González, A.; Hernández-Ríos, I. (2016). Caracterización de la agricultura protegida en la región del altiplano, de San Luis Potosí, México. *Agro Productividad*, 9(10), 87-92.

Hernández, E.M., Carrazana, D.I.G., González R.G., García, A.L., Marrero, O.C., Águila, E.J., Morales, A.M. y López, Y.H. (2017). Ecotoxicidad aguda de 8 antibacterianos con riesgo ambiental en *Physa cubensis P.* y *Artemia salina* L. *Toxicol*, 34, 118- 123

Huetio, J.K.P. (2009). Evaluación del crecimiento de la *Azolla pinnata* en efluentes piscícola y su efecto en la calidad de la calidad del agua. Ingeniería. Facultad de Ingeniaría Civil. Universidad del Cauca. Cauca, Panamá.

INEGI (2022). Unidades de producción agropecuaria en Querétaro. Censo Agropecuario 2022. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ca/2022/doc/inf_up_agro_qro_ca2022.pdf

Kamaruddin, N. A., Rahman, N. Z. A. and Ahmad, N. (2021). Evaluation of the nutrient composition of *Azolla microphylla* and *Azolla pinnata*. *Bioscience Research*, 18, 166-175.

Katole, S.B., Shweta R., Lende, S.R. y Patil, S.S. (2017). A review on potential livestock feed: *Azolla, Livestock Research International.* 5 (1), 01-09.

Lobato-de Magalhães, L.D., and Martínez, M. (2018). Temporary freshwater wetlands floristics in central Mexico highlands. *Botanical Sciences*, 96(1), 138-156.

Loor, B.Á.C., Carrión, R.R.A., y Mantilla, C.G.V. (2019). Vulnerabilidad de los acuíferos ante la percolación de agroquímicos en el Cantón Gral. Antonio Elizalde. *Universidad y Sociedad*, 11(2), 395-401.

Méndez-Martínez, Y., Pérez-Tamames, Y., Pérez, J. J. R. y Jimenez, V. D. P. (2018). *Azolla sp*., un alimento de alto valor nutricional para la acuicultura. *Biotecnia*, 20(1), 32-40.

Mendoza-Retana, S. S., Cervantes-Vázquez, M. G., Valenzuela-Garcia, A. A., Guzmán-Silos, T. L., Orona-Castillo, I., and Cervantes-Vázquez, T. J. Á. (2021). Uso potencial de las aguas residuales en la agricultura.

Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 12(1), 115-126.

Minhas, P., Ramos, T.B., Ben-Gal, A. y Pereira, L.S. (2020). Coping with salinity in irrigated agriculture: crop evapotranspiration and water management issues. *Agricultural Water Management*, 227, 105832.

Mosha, S. S. (2018). A review on significance of *Azolla* meal as a protein plant source in finfish culture. *Journal of Aquaculture Research and Development*, 9(7), 1-7.

Nordiah, B. Muta Harah, Z. Japar Sidik B. y Wan Hazma W. N. (2012). Rendimiento del crecimiento de *Azolla pinnata* en diferentes fuentes de agua. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 15 (13), 621-628.

Ortiz-Alamilla, A.I., Neri-Suárez, M., López-González, J.L., Vilaboa-Arroniz, J. (2023). Análisis de la agricultura protegida y sus impactos socioambientales en tres municipios de la Sierra Nevada de Puebla, México. *Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 8 (36), e2301061.

Pedrozo, A., Ramírez, N. (2020). La eutrofización de cuerpos de agua: un síntoma antropogénico que requiere atención perspectivas. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, 8, 1-3.

Reed, L.J., & Muench, H. (1938). A simple method of estimating fifty per cent endpoints. American Journal of Epidemiology, 27, 493-497.

Renganathan, P., Puente, E. O. R., Sukhanova, N. V., & Gaysina, L. A. (2024). Hydroponics with microalgae and cyanobacteria: Emerging trends and opportunities in modern agriculture. *BioTech,* 13(3), 27.

Reyes-Palomino, S.E. y Cano, D.M. (2022). Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(1), 53–64.

Rivera, L. M. (2017). Comportamiento de la *Azolla (Azolla spp.*) bajo diferentes condiciones ambientales y de manejo. *Cumbres*, 3(2), 95-105.

Sadeghi1, R., Zarkami, R., Sabetraftar, K. and Van Damme1. P. (2013). A review of some ecological factors affecting the growth of *Azolla spp. Caspian Journal of Environmental Sciences*, 11(1), 65-76.

Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A. y López-Cruz, I.L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencias del Agua,* 5 (2), 177-183.

Sood, A., Uniyal, P. L., Prasanna, R., and Ahluwalia, A. S. (2012). Phytoremediation potential of aquatic macrophyte, *Azolla. Ambio*, 41(2), 122-137.

Taghilou, S., Peyda, M., Mehrasbi, M. (2023). A review on the significance of *Azolla* for water and wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 293, 138–149

Tarif T.O.S., (2021). Use of *Azolla* as a substitute poultry feed and its effect on growth and production: A Review. *Plant Archives*, 21 (1), 947-950.

Vroom, R. J. E., Smolders, A. J. P., Van de Riet, B. P., Lamers, L. P. M., Güngör, E., Krosse, S., and Kosten, S. (2024). *Azolla* cultivation enables phosphate extraction from inundated former agricultural soils. *Water Research*, 254, 121411.

Winstead, D., Di Gioia, F., Jauregui, M. and Jacobson, M. (2024). Nutritional properties of raw and cooked *Azolla caroliniana* Willd., an aquatic wild edible plant. *Food Science & Nutrition*, 12(3), 2050-2060.

WFO (2025): World Flora Online. Publicado en Internet; http://www.worldfloraonline.org. Consultado el: 23 de septiembre de 2025. https://wfoplantlist.org/taxon/wfo-4000003824-2025-06

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Artificial Wetland as Ecotechnology in the Wastewater Treatment Plant (WWTP) using AutoCAD

Mendoza Kohrs, Monica* Bautista Vazquez, Juan de Dios* Cárdenas Martínez, Daniel* Murillo Corona, Ximena*

* *National Technological Institute of Mexico / ITS of Irapuato, Irapuato, Guanajuato, Mexico (e-mail: monica.mk@irapuato.tecnm.mx).*

Abstract: This research presents the development of a subsurface flow constructed wetland prototype as a complementary alternative to the Wastewater Treatment Plant (WWTP) of the Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI). The main objective was to design, build, and digitally model the system using AutoCAD tools, in order to optimize the treatment of wastewater generated by the institution, which currently shows operational deficiencies.

An analysis of different types of constructed wetlands was carried out, selecting the subsurface flow system due to its efficiency in contaminant removal, low maintenance requirements, and ease of integration into the existing system. For this purpose, a physical scale prototype was built using accessible materials such as gravel, PVC piping, and suitable vegetation (*Phyllostachys edulis*). In parallel, a digital model was developed in AutoCAD to visualize its operation and future integration into the WWTP. In addition, industrial engineering tools were applied, such as the "5 Whys" analysis, the Process Operation Diagram (POD), and the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), which allowed the identification of critical points, the establishment of maintenance plans, and the proposal of preventive measures. This project constitutes a viable, economical, and sustainable proposal to improve the efficiency of the wastewater treatment system at ITESI, while also promoting responsible water resource management within the educational environment.

Keywords: Wastewater, Wetland, Bamboo, Sustainability, Eco-Technology, Pollutants.

1. INTRODUCTION

Water is a vital resource, essential for life on our planet. However, with population growth and industrial activity, water pollution has become a critical problem. The daily use of water in homes, industries, and agriculture generates wastewater that, if not treated, can seriously damage aquatic ecosystems and public health. To counteract this problem, wastewater treatment plants (WWTPs) have emerged as a promising solution for cleaning and purifying contaminated water. WWTPs are facilities designed to remove solid, organic, chemical, and biological pollutants.

In this context, treated water can be safely returned to nature or even reused. This process not only protects aquatic life and reduces the spread of disease, but also contributes to water conservation by allowing water to be reused. To enable this reuse, contaminants are removed through a multi-stage process that combines physical, chemical, and biological methods.
The treatment process is generally divided into several stages:

- **Preliminary treatment**: Removes large solids such as trash and sand.
- **Primary treatment**: Suspended solids are separated through sedimentation tanks.
- **Secondary treatment:** Biological processes (bacteria) are used to break down dissolved organic matter.

If further purification is required:

- **Tertiary treatment (optional)**: Removes specific contaminants, such as nitrogen, phosphorus, or pathogens, to achieve a higher level of water quality.

Once the water has been treated, it can be returned to the natural environment or reused for non-potable purposes, such as agricultural irrigation or green areas, thus helping to conserve water resources.

1.1 Impact of Wastewater Treatment Plants (WWTP) within universities.

In higher education institutions, the implementation of Wastewater Treatment Plants (WWTPs) has a multifaceted impact that goes beyond simple waste management.

A university campus is a microcosm of a city, with thousands of students, staff, and activities that generate a considerable amount of wastewater. Therefore, having a WWTP is not only a response to the need to comply with environmental regulations, but also becomes a fundamental tool for sustainability and education.

The impact of WWTPs on universities is evident in several ways. First, there is a direct environmental benefit, as treated water can be reused for irrigation of green areas and gardens, significantly reducing drinking water consumption from the public network and alleviating pressure on local aquifers. This not only generates economic savings for the institution, but also fosters a culture of water efficiency among the university community.

Students from various disciplines can carry out practical work and research in a real-world environment, analyzing treatment processes, optimizing contaminant removal, and developing new technologies.

1.2 Subsurface flow constructed wetlands (HAFSs).

Subsurface flow constructed wetlands (SFWs) are wastewater treatment systems that mimic the natural purification processes that occur in wetlands. They work by passing water through a filter bed (gravel or sand), where plant roots, together with microbial communities, remove contaminants. These systems are notable for their low operating cost, easy maintenance, and high efficiency in removing organic matter, nutrients, and pathogens. In addition, they are a sustainable alternative to conventional treatment methods. HAFSs require less energy consumption and can be integrated into the landscape. For this reason, they are widely used in rural communities and in projects seeking ecological solutions.

2. BACKGROUND

The Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI), committed to training engineers and environmental sustainability, operates a Wastewater Treatment Plant (WWTP) to manage water resources. However, it has been identified that the plant does not function optimally, as the treated water does not meet the quality standards necessary for reuse.

Figure 1. Sample of the water output.

This deficiency results in effluent with high levels of contaminants, such as organic matter, nitrogen, phosphorus, and suspended solids, which contradicts the institution's sustainability principles and limits the use of treated water for activities such as irrigation. The current inefficiency has created an imbalance between operating costs and results, underscoring the urgency of finding a viable and economical solution to improve the system's performance.

2.1 Project Description and Feasibility

Given the problems with the WWTP, this project focused on developing a **prototype subsurface flow constructed wetland**. The main objective was to design, build, and model this system as a complementary eco-technology to optimize wastewater treatment. This type of wetland was chosen because of its high efficiency in removing pollutants, low maintenance requirements, and ease of integration.
The project demonstrates that the artificial wetland prototype is a **viable, economical, and sustainable proposal** for improving wastewater treatment on campus. Its full-scale implementation could optimize water quality, allowing for its reuse and mitigating negative environmental and economic impacts. This approach not only reinforces ITESI's commitment to sustainability, but also establishes a replicable model that could be adopted by other educational institutions for responsible water management.

3. METHODOLOGY

In Figure 1, a structured analysis was performed using the "5 Whys" quality tool to identify the root cause of the current problems in ITESI's wastewater treatment system.

This analysis revealed that the plant's malfunction is not solely a technical issue but is directly related to organizational factors such as lack of preventive maintenance, poor training of operating personnel, and insufficient investment in technological improvements. As a result, water treatment is inefficient, unpleasant odors are generated, and the effluent does not meet the parameters required for reuse.
Based on this root cause, it was considered necessary to propose a complementary alternative that was efficient, low-cost, easy to maintain, and environmentally sustainable. Therefore, a comparative analysis of the different types of existing artificial wetlands—surface, vertical, horizontal, and subsurface—was carried out to determine which one best suited the institutional context and current operational limitations.
This process concluded with the selection of the subsurface horizontal flow wetland as the most suitable type for developing the prototype, as it offers greater efficiency in removing contaminants, requires less maintenance, controls odors naturally, and can

be integrated in a phased manner into the existing treatment system.

Causa raiz		Es necesario implementar un humedal artificial subsuperficial en la PTAR del ITESI
Por qué 1	¿Por qué es necesario implementar un humedal artificial subsuperficial en la PTAR del ITESI?	Porque la calidad del agua tratada actualmente no cumple con los parámetros normativos para su reúso ni para su descarga segura al medio ambiente.
Por qué 2	¿Por qué la calidad del agua tratada no cumple con los parámetros normativos?	Porque el proceso de tratamiento actual no elimina eficientemente la materia orgánica, nutrientes ni microorganismos patógenos.
Por qué 3	¿Por qué el proceso de tratamiento actual no elimina adecuadamente esos contaminantes?	Porque la PTAR presenta deficiencias operativas, como equipos deteriorados, falta de mantenimiento y ausencia de un tratamiento terciario.
Por qué 4	¿Por qué la PTAR no cuenta con un tratamiento terciario ni condiciones óptimas de operación?	Porque no se han destinado recursos suficientes para la mejora del sistema y no se ha implementado una alternativa sustentable y complementaria.
Por qué 5	¿Por qué no existe un plan de mantenimiento preventivo y el personal no está capacitado?	Porque un humedal artificial subsuperficial no solo mejora la calidad del agua de forma natural, sino que también contribuye al equilibrio ecológico del campus, sirviendo como hábitat para la fauna local y ayudando a conservar la biodiversidad.
Resultado del Análisis		La implementación de un humedal artificial subsuperficial representa una solución sustentable y ecológica, que mejora la calidad del agua tratada y conserva la fauna y el entorno natural del campus, promoviendo un modelo integral de gestión del recurso hídrico.

Figure 2. 5 Why? of wastewater treatment.

3.1 Determination of prototype measurements.

A subsurface wetland prototype was designed as a proposal to implement one on a larger scale and thus achieve a more stable treatment, using accessible materials such as 225 L barrels, a 450 L water tank
L water tank, a 310 L tub, hydraulic connections, gravel, and Phyllostach edulis moso bamboo, as shown in Figure 3.

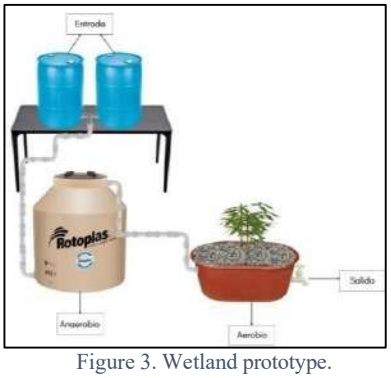


Figure 3. Wetland prototype.

In order to precisely define the actual dimensions of the scale model of the artificial wetland, the physical measurements of each of the main components of the system were determined. This information was essential for its representation in AutoCAD, as shown in Figure 4, allowing the complete design to be visualized in technical format.

Figure 4. Side view of the wetland prototype.

3.2 Prototype operations diagram.

A process operation diagram (POD) was developed to graphically and sequentially represent the treatment stages within the prototype, as shown in Figure 5. This visual tool facilitated the validation of the hydraulic design, allowing the water flow to be visualized from its entry into the reception barrels, through the anaerobic reactor (intermediate tank), to its exit through the artificial wetland in a tub with substrate and moso bamboo through the aerobic reactor.

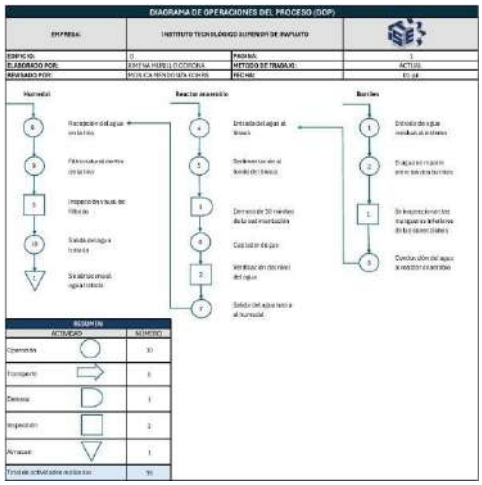


Figure 5. Process operation diagram (DQP)

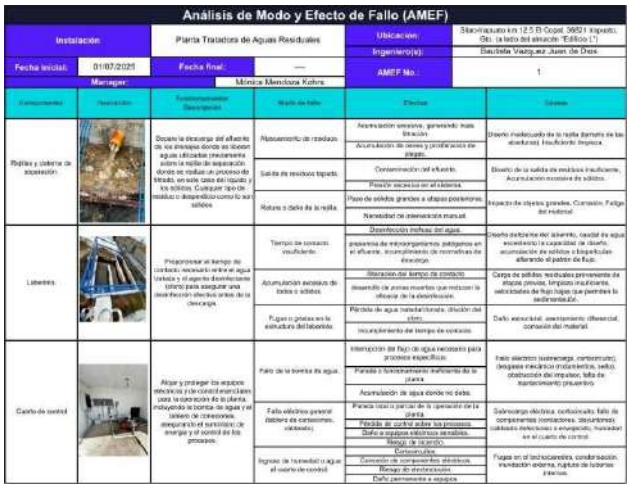
3.3 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) of the WWTP

As part of the methodology, a Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) was developed to identify and classify possible failures that could affect the plant's operation, their causes, consequences, and associated risk levels.
The FMEA allows critical areas of the system to be prioritized by evaluating three factors: Severity, Occurrence, and Detection, which leads to the calculation of the Risk Priority Number (RPN). Based on this analysis, corrective measures and preventive controls are proposed to reduce the probability of failures, minimize the impact of potential failures, and improve the early detection of anomalies.
Table 1 shows the color scale for determining severity, occurrence, and detection values in the FMEA.

Escala de colores
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
1

Table 1. Colors and values for determining the NPR

The study included the essential components of the system, such as separation screens, sumps, aeration tanks, clarifiers, disinfection labyrinths, filters, and electrical equipment in the control room. For each component, the most frequent failure modes and the technical or operational causes that generate them were described, and specific actions were defined for the technical personnel in charge of maintenance. As can be seen in the image, only the three most critical components of the FMEA were taken into consideration, as they had a higher percentage than the others, taking failure mode, effects, and causes as the only reference.



Análisis de Modo y Efecto de Fallo (AMEF)

Instalación:	Planta Tratadora de Aguas Residuales		Ubicación:	Sitio Arqueto km 12.5 El Cogal, 98521 Izapato, Gto. (a lado del almacén "Edificio L")	
			Ingeniero(a):	Bautista Vazquez Juan de Dios	
Fecha inicial:	01/07/2021	Fecha final:	AMEF No.:	1	
Manager:	Mónica Mendoza Kehrs				
Componente	Función	Funcionamiento/ Descripción	Modo de falla	Efectos	Causas
Rejillas y cribas de separación		Durante la descarga del efluente de los arenajes donde se liberan aguas ultratratadas previamente sobre la salida de separación donde se realiza un proceso de filtrado, en este caso del líquido y los sólidos. Cualquier tipo de residuo o desperdicio como lo son sólidos	Almacenamiento de residuos	Acumulación excesiva, generando mala filtración	Diseño inadecuado de la rejilla (tamaño de las aberturas). Insuficiente limpieza.
			Salida de residuos tapada.	Acumulación de aceites y proliferación de plagas.	
				Contaminación del efluente.	Diseño de la salida de residuos insuficiente. Acumulación excesiva de sólidos.
			Retorno o daño de la rejilla.	Presión excesiva en el sistema.	Impacto de objetos grandes. Corrosión. Fatiga del material
				Paso de sólidos grandes a etapas posteriores.	
				Necesidad de intervención manual.	
				Desinfección ineficaz del agua.	
Laberinto.		Proporcionar el tiempo de contacto necesario entre el agua tratada y el agente desinfectante (cloro) para asegurar una desinfección efectiva antes de la descarga.	Tiempo de contacto insuficiente.	presencia de microorganismos patógenos en el efluente, incumplimiento de normativas de descarga.	Diseño deficiente del laberinto, caudal de agua excesivo o la capacidad de diseño, acumulación de sólidos o biopelículas alterando el patrón de flujo.
			Acumulación excesiva de lodos o sólidos.	Alteración del tiempo de contacto.	Cargas de sólidos residuales previamente de etapas previas, limpieza inadecuada, velocidades de flujo bajas que permiten la sedimentación.
				desarrollo de zonas muertas que reducen la eficacia de la desinfección.	
			Fugas o grietas en la estructura del laberinto.	Pérdida de agua (salud/dilución)	Daño estructural, asentamiento diferencial, corrosión del material.
				Incumplimiento del tiempo de contacto.	
Cuarto de control		Alojar y proteger los equipos eléctricos y de control esenciales para la operación de la planta, asegurando el suministro de energía y el control de los procesos.	Falla de la bomba de agua.	Interrupción del flujo de agua necesario para procesos específicos.	Falla eléctrica (sobrecarga, cortocircuito), desgaste mecánico (rodamientos, sello), obstrucción del impulsor, falta de mantenimiento preventivo.
				Parada o funcionamiento ineficiente de la planta.	
				Acumulación de agua donde no debe.	
			Falla eléctrica general (apagón en centrosmex, cableado)	Parada total o parcial de la operación de la planta.	Sobrecarga eléctrica, cortocircuito, fallo de componentes (contactores, disyuntores), cableado defectuoso o envejecido, humedad en el cuarto de control.
				Pérdida de control sobre los procesos.	
				Daño a equipos eléctricos sensibles.	
			Ingreso de humedad o agua al cuarto de control.	Riesgo de incendio.	Fugas en el techo/paredes, condensación, inundación externa, rupturas de tuberías internas.
				Cortocircuitos.	
				Corrosión de componentes eléctricos.	
				Riesgo de electrocución.	
				Daño permanente a equipos.	

Figure 6. FMEA main components with the highest severity.

As a practical complement, a technical maintenance checklist was designed, which breaks down specific procedures, associated risks, required personal protective equipment (PPE), and possible environmental impacts resulting from poor waste and effluent management. The activities cover five main types of risks (biological, gas inhalation, physical accidents, failures due to poor maintenance, and improper handling of treated water). In summary, the evaluation shows the overall compliance and general observations for each concept evaluated.

Checklist of activities carried out within a Wastewater Treatment Plant.

Technical Action Required	Compliant		Observation
Biological Risk (Exposure to Pathogens)	1	2	There is a discrepancy between formal quality monitoring (physicochemical and microbiological analyses) and poor operational practices (lack of cleanliness) and risk management (omission due to lack of knowledge).
Risk of Gas Inhalation/Bad Odors	0	2	Lack of knowledge prevents tasks from being performed correctly, and the inappropriate choice of PPE, possibly also due to lack of knowledge, creates an immediate danger.
Risk of Falls or Slips	0	3	There is serious operational negligence manifested in the absence of essential maintenance activities, which compromises infrastructure and efficiency. At the same time, there is a failure to comply with basic safety standards due to the incorrect use or non-use of PPE.
Risk due to inadequate maintenance	0	3	There is a serious failure in maintenance and safety management. Negligence in basic tasks (cleaning and lawn care) compromises operational efficiency, and more importantly, the lack of knowledge about the risks of the WWTP directly exposes personnel to hazards, requiring immediate intervention in training and in the implementation and supervision of PPE.
Risk due to Inlet/Outlet Water Handling	1	2	The main bottleneck is logistics and the supply of resources (equipment, tools), which not only causes tasks to be suspended, but also forces staff to work with inadequate or incomplete equipment, compromising the quality of work and potentially their safety.

Figure 7. Checklist for a see risk within the WWTP

3.4 *Feasibility analysis for the implementation of AutoCAD.*

To demonstrate the feasibility of integrating this proposal into the WWTP, a physical prototype of the wetland was developed on a reduced scale, allowing for preliminary observation of its behavior and efficiency. However, in order to devise this improvement on a real scale and ensure proper integration into the current campus system, CAD software was used to develop a detailed digital model due to its high capacity for two- and three-dimensional technical design, which allows for accurate representation of the system's dimensions, internal structures, and hydraulic flow. In addition to this, the tool also addresses the need to integrate modern design technologies with optimal and sustainable solutions, promoting innovation and committed development among the team.

The use of AutoCAD for prototype design will allow for accurate and concise representation. It is widely used in engineering disciplines, as digital modeling allows for the creation of detailed and scaled plans, facilitating the identification of elements such as water inlet, distribution chamber, zones, and wetland outlet.

This becomes a fundamental stage in the process, as it allows the proven functionality of the prototype to be observed in a realistic, technically viable proposal that is adaptable to site conditions, detailing the structure and facilitating its evaluation, modification, and future implementation. In addition, the design will contribute to a better visualization of the project. Unlike the physical prototype, the digital model created in AutoCAD allows for adjustments, optimizations, and simulations to be made before any actual implementation, enabling the incorporation of annotations, dimensions, levels, and slopes, which are fundamental elements for correctly representing the hydraulic behavior within the system, ensuring that the water flow remains constant and efficient throughout the wetland. This helps prevent errors, save resources, and ensure proper integration with the existing infrastructure, complying with the standards required in environmental projects.

3.5 Analysis of the available land.

The first step in designing the wetland model was to analyze and delimit the dimensions of the land available within the Wastewater Treatment Plant (WWTP), as the proposed improvement is intended to complement the existing system rather than start from scratch. This stage is essential, as the physical characteristics of the space determine the feasibility, type, and capacity of the wetland to be implemented.

To this end, the actual measurements of the land allocated to the system were taken into account, including the length and width available. The total area of the WWTP is 800m2, 20m wide by 40m long, and the area for the wetland (subsurface flow), which is directly connected so that water flows by gravity, is 600m2, 20m wide by 30m long, so these measurements must be respected

dimensions must be respected when designing the actual model. These dimensions were obtained from a topographic survey carried out in the field, which was interpreted in order to adapt them to the environment required for the wetland.

Figure 8. Aerial view of the WWTP area at ITESI. Source: (2025). Google.com.

Having exact dimensions ensures not only the correct location of the system within the available land and the connection to the WWTP, but also its functionality, as it directly influences the hydraulic retention time, treatment efficiency, and maintenance of the subsurface flow

3.6 selection of materials.

The selection of materials for the construction of the wetland as a complement to the WWTP was made considering technical, environmental, and economic criteria, with the aim of ensuring the functionality, durability, and sustainability of the system.
The materials selected include:

3.6.1 **Gravel**: this is the main filtration medium, as it allows subsurface water flow, facilitates the retention of solids and contaminants, and promotes the development of microbial communities. Different grain sizes (1", 1 ½" and 2") were used to form layers with adequate permeability and retention time, ensuring an effective and long-lasting purification process.

3.6.2 **Vegetation (Phyllostachys edulis – moso bamboo):** chosen for its resistance to extreme conditions, low maintenance, and ability to remove nutrients and heavy metals. Its root system promotes gas exchange and substrate stabilization, contributing to the reduction of organic load and the improvement of treated water.

3.6.3 **PVC pipe (200 mm):** used to convey water from the inlet to the outlet of the wetland. Its corrosion resistance, ease of installation, and hydraulic compatibility make it a suitable and economical material.

3.6.4 **Polyethylene geomembrane (1.5 mm):** installed at the base of the system to prevent seepage into the subsoil and ensure controlled flow. Its flexibility, chemical resistance, and durability eliminate the need for concrete structures, reducing costs and ensuring long-term sustainability.

This information must then be integrated into the electronic model in AutoCAD, where it will be represented on a real scale that adapts to the needs of the total area of land. Likewise, the incorporation of materials will be represented to facilitate their visualization and distribution within the overall design of the water treatment system.

3.7 Electronic modeling in AutoCAD (cross-sections, measurements, plans).

Below is a schematic model of the WWTP system in its current state, as well as a design proposal with the integration of the wetland as a complement to the existing treatment.

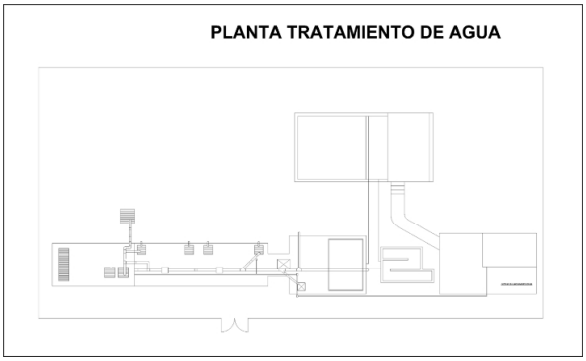


Figure 9. WWTP model. Own elaboration.

For the designed part of the process, an initial sketch was developed to help visually identify, organize, and classify the main functional areas of the wetland within the WWTP as part of the complement. This AutoCAD model will serve as a guide for structuring the wetland and ensuring a logical and efficient distribution of the system components. It was developed considering the previously determined dimensions of the terrain and focused on clearly delimiting the areas.

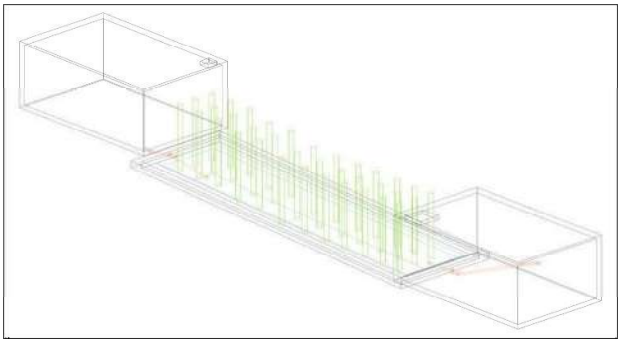


Figure 10. Three-dimensional structural visualization of the wetland connected to the WWTP. Own elaboration.

In this context, it is proposed that the wetland be incorporated as a stage after the storage pump station. This

strategic location will allow the system to operate mainly by gravity, without the need to implement additional electrical infrastructure for pumping water. In this way, the flow of water to the wetland is optimized, taking advantage of the natural slope of the terrain for its progressive distribution through the system.

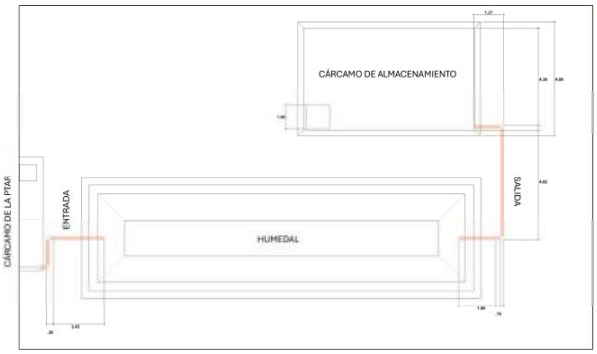


Figure 11. Top view of the WETLAND pipeline - Measurements. Own elaboration.

The wastewater treatment system, complemented by the incorporation, consists of: Treated water reception sump. Wetland. Treated water storage sump. Hydraulic installation.

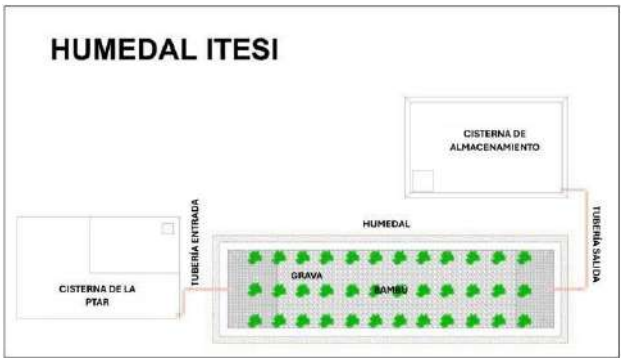


Figure 12. Aerial view of the final cistern of the WWTP - WETLAND - Storage tank. Own elaboration.

In addition, it defines in detail the internal distribution of the wetland components and their integrated order.

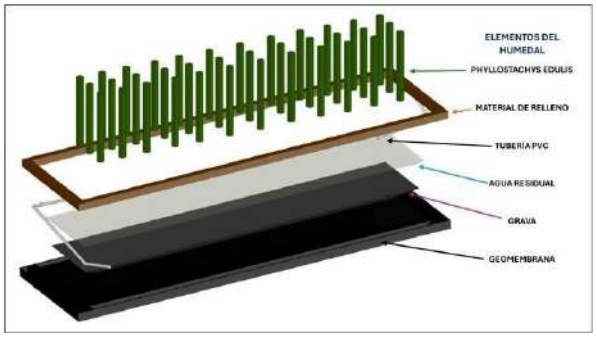


Figure 13. Visualization of elements interacting with the wetland. Own elaboration.

The front section of the artificial wetland is shown, where the distribution of the gravel layers, geotextile material, and emergent vegetation can be observed. This design allows horizontal flow through the porous medium, which favors the retention of suspended solids and the biological treatment of wastewater.

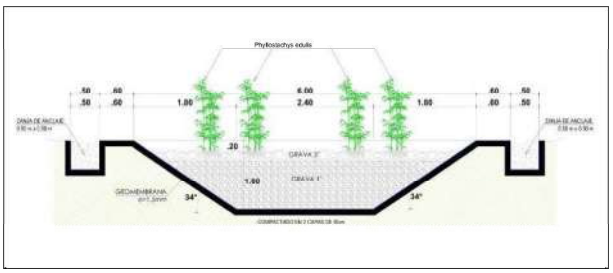


Figure 14. Frontal cross-section of the subsurface flow wetland. Own elaboration.

Cross section A of the wetland is shown, corresponding to the inlet area. This section details the initial structure where water enters the system, distributing itself evenly through the gravel layer. The slope and soil compaction are designed to prevent unwanted infiltration and ensure controlled flow.

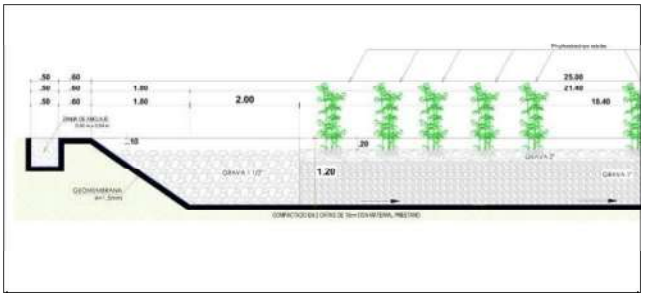


Figure 15. Cross-section A of the subsurface flow wetland - Entrance. Own elaboration.

It represents cross section B at the wetland outlet. At this point, the transition of the treated water towards the discharge system can be observed in greater detail, allowing for an assessment of the hydraulic behavior and the efficiency of the final purification process. The design of this section ensures that the hydraulic retention time (HRT) is sufficient to complete the removal of contaminants, preventing premature discharges that could affect the quality of the effluent.

The aquatic vegetation, in addition to providing aesthetic and ecological value, plays a fundamental role in the absorption of residual nutrients, such as nitrogen and phosphorus, contributing to the reduction of the organic load in the water. Likewise, the roots promote substrate aeration, improving aerobic conditions and enabling the growth of beneficial microorganisms that enhance the biological treatment process. The substrate serves a dual function: it acts as a physical medium for plant growth and as a natural filter, retaining suspended solids and facilitating the sedimentation of finer particles. The correct selection of grain size and materials ensures the structural stability of the system and a uniform flow of water along the profile.

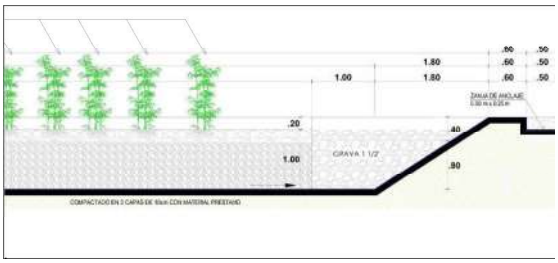


Figure 16. Cross-section B of the subsurface flow wetland - Outlet. Own elaboration.

These electronic models, created in AutoCAD, are essential for understanding the physical structure of the wetland and the operating principle of subsurface flow. They also allow the design criteria used to be visualized, such as the selection of filter material, wall slopes, and vegetation layout, which are decisive for treatment efficiency.

4 RESULTS

The efficiency of the subsurface artificial wetland prototype was evaluated by analyzing samples of water entering and leaving the ITESI WWTP. Physicochemical parameters were measured in the laboratory and compared with the limits established in NOM-003-SEMARNAT-1997 and NOM-001-SEMARNAT-2021, with relevant variations being observed, as shown in Table 1.

DATO	PARÁMETRO	VARIABLE QUE LO REPRESENTA	UNIDADES	RESULTADO	NORMATIVA (mg/l)
ENTRADA	Demanda química de oxígeno	DQO	mg/l	43	200
	Nitrógeno Total	N	mg/l	39.5	15
	Fósforo	P	mg/l	6.5	18
	Potencial de hidrógeno	pH	Unidades de pH	9.04	5-10
	Conductividad	σ	S/m	849	< 1,000 µS/cm
	colorimetría	(Pt-Co)	Pt-Co	120	(valor estético, ideal < 50)
SALIDAS	Demanda química de oxígeno	DQO	mg/l	20	200
	Nitrógeno	N	mg/l	10.5	15
	Fósforo	P	mg/l	6.35	18
	Potencial de hidrógeno	pH	Unidades de pH	8.16	5-10
	Conductividad	σ	S/m	837	< 1,000 µS/cm
	colorimetría	(Pt-Co)	Pt-Co	170	(valor estético, ideal < 50)

Table 2. Results of the inflow and outflow parameters.

For a better visual understanding, a comparative graph of the input, output, and regulatory limit values was prepared, thus facilitating the interpretation of the system's efficiency, as shown in Figure 1.

The removal efficiency of the main contaminants was calculated using the following formula.

$$K\square\square\square\square\square\square\square\square\ (\%) = \left[\frac{(K\square\square\square\square\square\square\ - \square\square\square\square\square\square)}{K\square\square\square\square\square\square}\right] \times 100$$

The efficiency results are shown in Table 2.

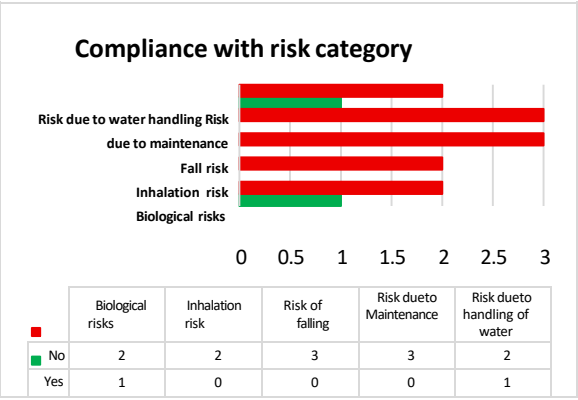
Parámetro	Entrada	Salida	Eficiencia (%)
DQO	43	20	53.50%
N	39.5	10.5	73.40%
P	6.5	6.35	2.30%

As a result of the study at the ITESI WWTP, critical points were identified using FMEA. The main causes were lack of preventive maintenance and corrosion wear, and corrective actions such as periodic maintenance and structural improvements were established. The analysis of the Risk Priority Numbers (RPN) showed very high results that must be addressed as soon as possible due to the damage that can be caused by lack of maintenance, both environmentally and to health and mechanisms. Similarly, it was decided to generate a new RPN, which will reduce non-compliance with the recommended actions.

	Failure mode	CURRENT NPR	IMPROVED RPN
1	Jamming	252	42
2	Exit	240	96
3	Breakage	144	32
4	Accumulation	252	28
5	Obstruction	240	96
6	Failure	252	126
7	Obstruction of diffusers	240	96
8	Contact time contact	504	168
9	Accumulation excessive	336	96
10	Leaks or cracks	210	42
11	Pump failure	432	80
12	Electrical failure	450	90
13	Moisture ingress Moisture	280	70
14	Filter filters.	252	56
15	System failure	240	24
16	Equipment failure	252	27

Figure 8. Results of the current NPR and improved NPR.

Likewise, the graph based on the checklist shows widespread non-compliance in the maintenance activities of the ITESI WWTP. Red bars predominate, highlighting total non-compliance in fall hazards and inadequate maintenance. Only in the management of inlet and outlet water is there partial compliance. This reflects a lack of staff training, operational deficiencies, and failure to use PPE, increasing occupational risks and treatment failures.



	Biological risks	Inhalation risk	Risk of falling	Risk dueto Maintenance	Risk dueto handling of water
No	2	2	3	3	2
Yes	1	0	0	0	1

Graph 1. Compliance results by risk.

The wetland prototype reduced nitrogen concentration by 73.40%, reaching values that comply with regulatory criteria. This result is favorable and confirms the system's efficiency in removing nitrogen compounds.

The design of the subsurface flow constructed wetland, represented electronically in AutoCAD, demonstrates the feasibility of integrating it as a complementary stage to the current treatment at the ITESI WWTP. This model allowed for accurate visualization of the structure, dimensions, slopes, and hydraulic flow of the system, optimizing its operation by gravity and without additional energy consumption
.
The system is composed of materials such as gravel, impermeable geomembrane, and vegetation (bamboo), which act together to improve the quality of treated water through natural processes of filtration, absorption, and biodegradation. In addition, the modeling ensured its correct location on the available land, guaranteed adequate retention times, and prevented leaks. This validates that the wetland is a functional, sustainable, and low-maintenance eco- technology capable of improving wastewater treatment for reuse, complying with technical, regulatory, and environmental criteria.

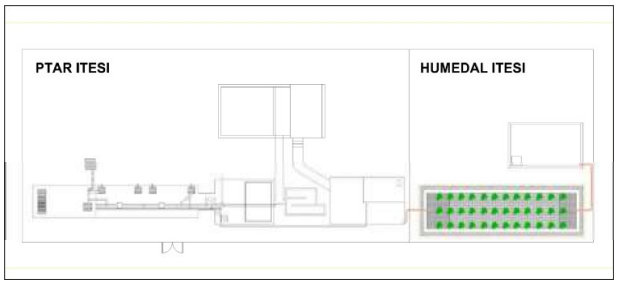


Figure 2. Layout of the WWTP with the ITESI WETLAND. Own elaboration.

5 CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS

5.5 Parameter efficiencies.

The results of the subsurface artificial wetland prototype demonstrated its effectiveness in improving the quality of water treated by the ITESI WWTP. The 53.50% reduction in Chemical Oxygen Demand (COD) reflects a considerable decrease in biodegradable organic matter, representing a significant improvement in secondary treatment. Likewise, the 73.40% reduction in Total Nitrogen showed high efficiency in the removal of nitrogen compounds. In contrast, phosphorus removal was low (2.30%), although within the permitted limit, indicating the need to explore substrates with greater adsorption capacity.

The pH and conductivity remained within the regulatory ranges, reflecting chemical stability. However, there was an increase in coloration, probably due to natural compounds in the substrate or vegetation. Although this does not pose a health risk, it may affect its appearance for reuse purposes.

5.6 Implications

The system proved to be viable as a tertiary treatment stage, especially in contexts with technical or budgetary constraints. Its gravity-driven operation and use of accessible materials reinforce its profile as a sustainable and low-cost eco- technology. In addition, modeling in AutoCAD allowed for validation of its design and facilitates its future implementation on a larger scale at ITESI or other institutions.

REFERENCES

Cely Calixto, N. J., Carrillo-Soto, G. A., & Bonilla Granados, C. A. (2022). Tratamientos de aguas residuales. Ecoe Ediciones.

Bonilla Abarca, L. A. (2017). Tratamiento de aguas residuales de textilería utilizando carbón activado. Grupo Compas.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). Guía técnica para el diseño y operación de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales municipales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.gob.mx/conagua.

Metcalf, L., & Eddy, H. (2021). Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento y reutilización. Editorial Reverté.

Pérez, J. A., & Gómez, L. F. (2021). Evaluación de un sistema de tratamiento natural de aguas residuales en zonas rurales. Revista Facultad de Ingeniería, 30(56), 45–58.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Adaptation of an Internal Combustion Engine for the Generation of Electrical Energy Using Biogas Obtained from Agricultural Biomass

Valenzuela Valenzuela, Juan.* García Vidaña, Norma Alicia.* Acevedo Romero, Mirka Maily. Martínez Rivera, José Antonio.* Godínez García, Francisco Javier.* Muñoz Ramos, José de Jesús****

**Maestría en Ingeniería, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Durango, Durango, Dgo. México, CP. 34080*
(Tel: 618-815-6974; e-mail: norma.garcia@itdurango.edu.mx).

*** Ingeniería en Agronomía, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana, Durango, Dgo. México, CP. 34371*

Abstract: Proper management of agricultural waste makes this activity more cost-effective for producers by harnessing their polluting waste and transforming it into a source of clean energy. Organic waste generated in protected agriculture as a post-harvest product, as well as waste from the livestock industry, are currently sources of air pollution that can be treated to produce biogas, which can then be used to generate electricity. This work focuses on the production of biogas through an anaerobic process from agricultural waste and the development of a prototype for the conversion of said biogas to electrical energy through an internal combustion engine with a capacity of four horsepower (HP) to which modifications were made to the carburetion system and a pressure regulator was installed as a complement, adequate to the capacity of the engine, which is coupled to a 1 kW (1,000 watts) electric generator and a 120 V alternating current output in order to use it as support for the basic requirements within the greenhouse such as powering climate monitoring sensors and other automation needs.

Keywords: Biomass, biogas, generator, electricity, engine.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, alrededor del **22%** de la electricidad en México proviene de fuentes renovables. De acuerdo con el **Plan México**, el Gobierno Federal se ha planteado la meta de incrementar esta participación al **25% en 2025** (Gobierno de México, s.f). El Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) señala que el éxito de dicho plan dependerá de garantizar un acceso ininterrumpido a la energía, con menores emisiones de carbono y a precios competitivos (Instituto Mexicano para la Competitividad [IMCO], 2025).

El país posee un gran potencial para ampliar el aprovechamiento de energías limpias. Su ubicación geográfica y condiciones climáticas representan ventajas estratégicas: altos niveles de radiación solar, vientos constantes en diversas regiones, abundantes recursos hídricos y geotérmicos, así como grandes volúmenes de residuos agrícolas, forestales y urbanos con capacidad de transformar en bioenergía (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2018).

Aún con estas ventajas, seguimos afrontando retos significativos: fallas en la red eléctrica, costos elevados y comunidades, principalmente rurales, que siguen sin tener acceso a la electricidad. Esta carencia no solo limita el acceso a servicios básicos, sino que también aumenta la brecha digital y restringe la inclusión en la era de las tecnologias de la información.

Una estrategia viable es promover el uso de energías renovables para producir electricidad de manera sostenible. Con ello, no solo se contribuiría a mitigar el cambio climático, si no también a impulsar esquemas de **economía circular** mediante aprovechamiento de recursos locales.

Un sector con alto potencial de beneficio es el **agrícola**, particularmente la agricultura protegida, que demanda un suministro energético estable y sostenible para su operación y automatización. A su vez, este sector puede gestionar adecuadamente sus residuos orgánicos para transformarlos en biogás, cerrando el ciclo productivo y fortaleciendo la sostenibilidad.

El biogás producido a partir de estos residuos, desde el punto de vista ambiental, aporta en dos sentidos, ya que mitiga la producción de gases de efecto invernadero y reduce el uso de combustibles fósiles para la producción de energía (Blanco *et al*., 2017).

Este estudio presenta el desarrollo de un **prototipo de generación de energía eléctric**a orientado a satisfacer las necesidades energéticas de los invernaderos, tales como la alimentación de sistemas de control de teperatura, humedad relativa y del suelo, entre otros, así como equipos de ventilación, calefacción y riego. El modelo se fundamenta en el aprovechamiento de **biogás obtenido a partir de residuos agropecuarios**, combiando tanto los desechos generados por las **cosechas de los invernaderos** como los **residuos**

pecuarios, lo que permite transformar subproductos agrícolas y ganaderos en un recurso energético renovable dando con ello sostenibilidad a las actividades agropecuarias (Quesada *et al*., 2007).

El biogás es filtrado y suministrado a un motor de combustión interna(ciclo Otto) de cuatro caballos de potencia (HP), al cual se le realizaron modificaciones en el sistema de carburación y se le incorporó un **mezclador de gases** adecuado a su capacidad. Dicho motor se encuentra acoplado a un **generador eléctrico de 1 kW**, con una salida de **120 V~** y una corriente máxima de **7,3 A**, lo que garantiza el suministro de energía limpia para el invernadero.

2. ANTECEDENTES

Las investigaciones en la generación de la energía eléctrica por medio de la biomasa indican que esta área se encuentra en sus inicios: "En el año 2022, la generación por bioenergía en México solo representó el 0.63% del total" (Secretaría de Energía [SENER], 2023, p. 209); por lo tanto, este estudio busca fomentar el uso de la biomasa agropecuaria para generar biogás como combustible para un generador eléctrico.

En el estado de Durango, la agricultura protegida se ha incrementado en los últimos años en la producción de hortalizas como tomate, pepino y chile, entre otras. La generación de biomasa a partir de la postcosecha es considerada un contaminante, pues se vierte en zonas abiertas o a inmediaciones del invernadero, sin ser aprovechada como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Mala disposición de postcosecha.

2.1 Biomasa

La biomasa es una fuente de energía renovable que puede definirse como toda materia orgánica no fosilizada de origen vegetal, animal, así como del resultado de un proceso biológico espontáneo o por una transformación artificial que puede emplearse como materia prima en la producción de biocombustibles (Neches, 2011; Velázquez-Martí, 2018).

La fermentación metánica es la digestión anaerobia de la biomasa por la acción de bacterias en ausencia de oxígeno. Es de gran utilidad en la transformación de biomasa con un contenido de humedad superior al 75% y es aplicable en las explotaciones agropecuarias (Romanelli *et al*., s. f.), por lo que "es indudable el protagonismo que posee la agricultura como sistema de producción de productos biomásicos susceptibles de ser transformados en biocombustibles" (Velázquez-Martí, 2018, p. 23).

La digestión anaeróbica admite el mayor aprovechamiento de la biomasa, debido a que permite utilizar una amplia variedad de residuos, principalmente todos aquellos que contienen un alto grado de contenido de humedad (Lozano y Sandoval, 2024).

2.2 Biogás

El biogás es una fuente natural de energía renovable proveniente de la descomposición de biomasa mediante la acción de bacterias, especialmente metanogénicas, en condiciones anaeróbicas (Jameel *et al*., 2024). Es una mezcla de diferentes gases como metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) así como trazas de otras especies químicas como sulfuro de hidrógeno (H_2S) y vapor de agua. El proceso de obtención de biogás abarca cinco etapas según Jameel *et al*. (2024) y Varnero-Moreno (2011):

1. Preparación de la mezcla. Se eliminan las impurezas de la materia orgánica, se forma una mezcla con agua y se intruduce en el biodigestor.
2. Hidrólisis. Las grandes moléculas como grasas, carbohidratos y proteínas, son degradadas; como resultado, se obtienen moléculas más simples compuestas de carbono e hidrógeno, así como dióxido de carbono, ácidos grasos y aminoácidos.
3. Acidogénica. Las bacterias metanogénicas y acetogénicas llevan a cabo la formación de ácidos volátiles a partir de los compuestos producidos en la fase anterior, y producen el alimento para las bacterias que actúan en la siguiente fase.
4. Acetogénica. productos como dióxido de carbono, hidrógeno, acetato y sulfuro de hidrógeno, así como pequeñas cantidades de metano, entre otros, son producidos por las bacterias acidificantes.
5. Metanogénica. Las bacterias producen metano, dióxido de carbono y agua alcalina. La producción de metano depende de proporcionar a las bacterias metanogénicas condiciones adecuadas de pH, y brindar los productos del metabolismo de las bacterias acidogénicas como alimento, logrando entre ellas una buena simbiosis (Kougias, 2016).

2.3 Biodigestor

Según Varnero-Moreno (2011), un biodigestor es el dispositivo principal donde se desarrolla el proceso bioquímico de la digestión anaeróbica y se efectúa la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, tiene además el objetivo de impedir que escapen olores, conservar la temperatura, evitar la entrada de oxígeno (cerrado herméticamente) y recolectar el biogás producido

Clasificación de los biodigestores:

1. Reactores anaeróbicos de baja velocidad. Dentro de estos se encuentran los estanques anaeróbicos, tanques sépticos,

tanques Imhoff y el digestor anaeróbico de velocidad estándar.
2. Reactores anaeróbicos de alta velocidad subclasificados en tres tipos:

a) Crecimiento suspendido, como son los digestores anaeróbicos de alta velocidad, proceso anaeróbico de contacto, de flujo ascendente con lecho/manto de lodo y los reactores de secuencia tipo batch;

b) De crecimiento adherido, dentro de los cuales se encuentran los de filtro anaeróbico y el reactor de lecho fluidizado/expendido;

c) Otros, en los que se incluyen reactores de lecho granular estático, de membrana anaeróbica y el híbrido

2.4 Motor

El generador eléctrico utiliza un motor de combustión interna de cuatro tiempos (ciclo Otto) con una sola garganta. Sus principales características se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.- Características del motor de combustión interna.

Descripción	Valor
Caballos de potencia	4HP
Eficiencia	73%
Régimen de giro o revoluciones por minuto	3,400 RPM

Un motor de combustión interna es un dispositivo cuya principal característica es aprovechar la energía química que provee un combustible para ser transformada en energía térmica y esta a su vez, en energía mecánica rotacional. Esto se da por la oxidación del combustible en el interior de la cámara del cilindro por medio de la explosión, permitiendo que toda la fuerza sea aplicada en la cara del pistón, transfiriéndola por medio del mecanismo biela manivela acoplado al cigüeñal (Herrera, 2020), por medio de un proceso de cuatro tiempos (admisión, compresión, explosión y escape), llamado también ciclo Otto.

2.5 Generador eléctrico

Es el dispositivo encargado de transformar la energía mecánica, proveniente del motor de combustión interna a energía eléctrica por medio de la inducción magnética, la cual es proporcionada a las bobinas del estator a través del embobinado del rotor, y es controlada por un regulador automático de voltaje (AVR, por sus siglas en inglés) de dos polos, una fase a 60 ciclos por segundo (cps). La Tabla 2 muestra las características del generador eléctrico.

Tabla 2.- Características del generador monofásico.

Descripción	Valor
Potencia pico	1 kW
Corriente máxima	7.8 A
Voltaje AC	120 V

2.6 Área de impacto

Los invernaderos de media a baja tecnología son estructuras que, generalmente no cuentan con abastecimiento de energía eléctrica, lo que dificulta la instalación de sensores de monitoreo de clima o sistemas automatizados de riego o apertura de ventanas. En el Valle del Guadiana existen pequeños productores dedicados a la agricultura protegida que se encuentran en las condiciones antes descritas y que, además, se enfrentan al problema de la disposición de los residuos orgánicos de la postcosecha. Contar con un sistema de generación de energía eléctrica a partir de la biomasa generada puede ser una alternativa para el aprovechamiento de esta materia orgánica y una fuente de energía para las necesidades básicas de gestión de clima dentro del invernadero.

3. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo la generación de energía eléctrica a partir del biogás de acuerdo al proceso descrito en la Figura 2.

Figura 2. Proceso de generación de energía eléctrica por biogás.

Una vez procesada la biomasa en el biodigestor, el biogás pasa por un filtro que ayuda a reducir la concentración de sulfuro de hidrógeno para luego entrar al generador y obtener finalmente la energía eléctrica.

3.1 Tratamiento de la biomasa

La biomasa compuesta de residuos de la postcosecha de hortalizas y estiércol de bovino, entra en un pretratamiento en el que se somete a un proceso de licuado y se combina con la cantidad apropiada de agua para formar una mezcla homogénea que será afluente de alimentación al reactor para el proceso de digestión. Véase Figura 3.

Figura 3. Pretratamiento de la biomasa.

La relación carbono-nitrógeno del afluente se calculó mediante la ecuación 1:

$$K = \frac{C_1\,Q_1 + C_2\,Q_2 + C_3\,Q_3 + \cdots + C_n\,Q_n}{N_1\,Q_1 + N_2\,Q_2 + N_3\,Q_3 + \cdots + N_n\,Q_n} \qquad (1)$$

Donde K es la relación C/N de la mezcla de materia primas, C y N son el porcentaje de carbono y nitrógeno contenido en cada materia prima respectivamente, y Q es el peso fresco de cada materia, expresado en kilos o toneladas.

Para calcular el volumen de agua que se requiere mezclar con la biomasa y dar la proporción adecuada de sólidos totales, se aplicó la ecuación 2:

$$Wa = \frac{Qt \cdot ST}{\%STd} - Qt \quad (2)$$

Donde Wa es el agua agregada en L/kg de biomasa, Qt, es el peso fresco de la materia prima (biomasa) dado en kg o ton, $\%STd$ es el porcentaje de solidos totales (carga diluida) y $\%ST$ es el porcentaje de solidos totales (biomasa).

3.2 Producción de biogás.

Se construyó un biorreactor con la finalidad de tratar los residuos agropecuarios y producir biogás por lotes. Este consta de un tanque alimentado con la biomasa, que hace las veces de biodigestor, y una cámara de captación del biogás producido. Para el tanque alimentado se utilizaron 2 bidones de 20 y 50 litros de capacidad, cerrados herméticamente y adaptados con una válvula de salida para el biogás, el cual se concentra en dos cámaras de llanta con capacidad de 0.088 m^3 y 0.075 m^3, respectivamente, como se muestra en la Figura 5. Estos, además, cuentan con un filtro de H_2S que purifica el biogás, aumentando su calidad y alargando con ello la vida útil del motor de combustión interna.

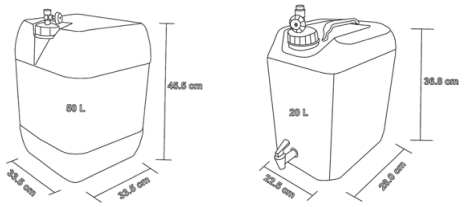


Figura 4. Diagrama de los biodigestores

Figura 5. Bidones de plástico (20 y 50 litros) adaptados como biodigestores, utilizando una cámara de llanta para almacenar biogás.

3.3 Combustión del biogás

En la combustión del biogás ocurre una reacción rápida de oxigenación/oxidación, representada por la ecuación 3:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \quad (3)$$

Su requerimiento mínimo de oxígeno sería del 21% y puede ser aumentada para lograr una buena combustión (Varnero-Moreno, 2011).

En la obtención del consumo específico volumétrico del combustible m3/kWh se utilizó la ecuación 4, según Arellano-Bustamante (2015, p. 17).

$$SfC_{vol} = \frac{SfC_{mas}}{\rho B_g} \quad (4)$$

Donde SfC_{vol} es el consumo específico volumétrico del biogás, SfC_{mas} es el consumo específico del biogás por unidad de masa en kg/kWh y ρ es la densidad del biogás en kg/m^3, B_g es el porcentaje de metano en el biogás.

3.2 Generador de energía eléctrica

Barasa-Akani (2022) afirman que los motores de combustión interna pueden funcionar con biogás, y que cada motor requerirá modificaciones de acuerdo con el tipo de biogás utilizado. En este caso, se utilizó un motor de combustión interna con una capacidad de cuatro caballos de potencia de ciclo Otto, modificado mediante un cambio en el sistema de carburación por uno dual, que puede funcionar con gasolina, gas de tipo natural o LP y, además, ahora con el biogás obtenido en el proceso antes descrito. Véase Figura 6.

Figura 6. Carburador dual modificado.

Adicionalmente, se agregó un regulador de presión para el flujo del biogás según los requerimientos del sistema de carburación o bien cerrar el flujo cuando el motor se encuentra apagado.

Figura 7. Motor modificado para combustión de biogás..

El motor se encuentra acoplado a un generador de energía eléctrica que produce 1 kWh, como máxima potencia. Véase Figura 7.

4. RESULTADOS

4.1 Obtencion del biogás

Se utilizó la mezcla formulada con residuos vegetales y estiércol de bovino como estrategia para la mejora del contenido de nutrientes (Nsair *et al*., 2020).

La relación carbono-nitrógeno(C/N) obtenida fue de 20.57:1, esto indica que se encuentra dentro del rango óptimo, según Varnero-Moreno (2011) y Nsair *et al*. (2020), quienes mencionan un rango ideal entre 20:1 y 30:1, para que la actividad bacteriana no se inhiba durante el proceso de digestión anaerobia.

Se agregaron 2.5 litros de agua por cada kilogramo de biomasa, por lo que se obtuvo en total 19 litros de biomasa pretratada, los cuales se depositaron en el biodigestor. El tiempo de retención hidráulica (TRH) fue de 126 días, con temperatura ambiente promedio de 21.16°C. El tipo de fermentación que se dio dentro del biodigestor es de tipo *psychrophilic*. El pH de la mezcla fue de 7.49.

Bajo las condiciones mencionadas en el afluente fue posible obtener un volumen total de biogás de 0.1811 m^3, con un peso de 0.13512 kg el cual fue almacenado en cámaras de llanta adaptadas como contenedores.
La caracterización del biogás se realizó en laboratorio utilizando un analizador BIOGAS 5000 (marca LANDTEC), para identificar sus principales componentes. El análisis se llevó a cabo mediante la extracción de una muestra de gas directamente de la cámara recolectora, utilizando una manguera conectada al equipo. La muestra fue succionada por la bomba interna del analizador y se hizo pasar por los sensores que utilizan tecnología de infrarrojo no dispersivo (NDIR) para medición de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), así como sensores electroquímicos para medir las concentraciones de otros gases como oxígeno (O_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y monóxido de carbono (CO). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8. Como principales componentes del biogás aparecen el gas metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2), además se midió el contenido de sulfuro de hidrógeno (H_2S) que resultó en 15 ppm. Según Vanero-Moreno (2011), para que un biogás sea apto para combustión y obtención de energía, debe contener al menos 55% de metano en su composición. Además, se debe respetar un contenido límite de sulfuro de hidrógeno de 100 ppm, ya que este gas, al entrar en contacto con el vapor de agua contenido en la mezcla, tiende a la formación de ácido sulfúrico, que es altamente corrosivo para el motor y sus componentes. Estos resultados coinciden con los reportados por Herout *et al*. (2011), quienes obtuvieron un biogás con características similares, usando una mezcla diferente de biomasa y usando un tiempo de retención de 40 días, con temperaturas promedio de 40°C.

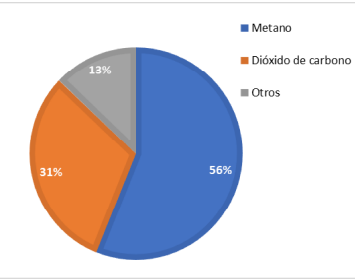


Figura 8. Composición del biogás obtenido

Para medir los sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) se utilizó una mufla (marca Felisa, modelo FE-340), una balanza analítica (marca OHAUS, modelo PR-224), siguiendo el procedimiento establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015. Los valores obtenidos fueron: ST=9,525 mg/L y SV=4,600 mg/L. En la medición de la conductividad eléctrica (CE) y el potencial oxido reductor (ORP) se utilizó el medidor multiparamétrico (marca HACH modelo HQ440d), obteniendo para cada indicador valores de CE 0= 5.13 mS/cm y de ORP = -312.7 mV.

4.2 Generación de energía eléctrica

Se suministró un volumen de 0.0629 m^3 (0.0508 kg) de biogás al motor del generador para probar su funcionamiento. Mediante un voltímetro localizado en el panel frontal del generador, se verificó que el voltaje de salida fuera de 120 V de corriente alterna; como segunda prueba, se conectó una lámpara y se encendió para comprobar la generación de electricidad. Véase Figura 9.

Para mantener en operación el motor de combustión interna y el generador produzca 1 kWh, es necesario suministrarle 1.608 m^3 de biogás por hora, esto coincide con lo reportado por Herrero (2019). Si se requiere que el equipo (motor-generador) funcione durante 8 horas, la demanda del volumen de biogás sería de 12.87 m^3, por lo tanto, para producirlo es necesario que la mezcla a fermentar contenga 512 kg de biomasa.

Figura 9. Prototipo funcional del generador de energía eléctrica mediante biogás a partir de biomasa agropecuaria.

5. CONCLUSIONES

Después de realizar las pruebas con el generador de energía eléctrica alimentado por biogás obtenido de biomasa agropecuaria, se concluye lo siguiente:

Mediante la biomasa que resultó de la combinación de plantas de tomate, pepino, chile ancho y excreta de bovino, se obtuvo un biogás de buena calidad, de acuerdo con los resultados de laboratorio y la información previamente reportada en la literatura, lo que permite su uso como biocombustible en motores de combustión interna de ciclo Otto. Sin embargo, para aumentar el porcentaje de metano en el biogás, es recomendable, variar los tipos y proporciones de biomasa utilizados en las mezclas para mejorar la relación carbono/nitrógeno (20:1 a 30:1) y por otro lado, mantener el biodigestor a una temperatura ambiente constante de entre 25ºC a 35ºC *(fermentación mesophilic)*.

Las modificaciones en el carburador y la adaptación de un regulador de presión fueron factores clave para utilizar biogás como biocombustible en el motor de combustión interna, así como reducir al mínimo las impurezas presentes en el biogás mediante el proceso de filtrado.

El desarrollo de este sistema de generación de energía eléctrica a partir de biogás obtenido de biomasa agropecuaria surge de la necesidad detectada en los invernaderos del Valle del Guadiana: disponer de una fuente de energía que cubra los requerimientos básicos en la gestión del clima dentro del invernadero, así como hacer una disposición adecuada de los residuos de la postcosecha. Además, usar los lodos sobrantes después de haber cesado la fermentación anaerobia como biofertilizantes.

Se concluye también que este sistema no solo es viable, sino que también puede generar un modelo de economía circular, permitiendo a los productores, volverse autosustentables.

Es importante que cada productor que adopte este sistema reciba la asesoría técnica adecuada, ya que dependerá del tamaño del invernadero, de la caracterización de la biomasa y de la calidad de biogás producido, determinar la capacidad del generador que cubra la demanda energética.

REFERENCIAS

Arellano- Bustamante, J. (2015). Diseño y construcción de un mezclador para gases en un motor de combustión interna. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería]. Archivo digital. https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000729049/3/0729049.pdf

Barasa-Kabeyi M.J., Akanni Olanrewaju O. (2022) Technologies for biogas to electricity conversion. Energy Reports, 8, 774-786. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.007

Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., & Levy, A. (2017). Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico. Banco Interamericano de desarrollo.

Gobierno de México. (s. f.). Plan México. Gobierno de México. https://www.planmexico.gob.mx

Herrera-Atehortúa, A. (2020). Diseño de un sistema de refrigeración para un motor de combustión interna. [Trabajo de grado, Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica]. Archivo digital https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/7992eb67-1d97-4a74-b7d7-5fc88f4bd042/content

Herrero, J. M. (2019). Biodigestores Tubulares: Guía y Diseño de Instalación. Redbiolac, 27. https://www.researchgate.net/publication/337064154_Biodigestores_Tubulares_guia_de_diseno_y_manual_de_instalacion_2019_J_Marti_Herrero

Herout, M., Malaťák, J., Kučera, L., & Dlabaja, T. (2011). Biogas composition depending on the type of plant biomass used. Research in Agricultural Engineering, 57(4), 137-143.

Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO). (2025). *Gas natural en América del Norte: Investigación*. https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2025/09/GasNaturalAN_Investigacion_20250904.pdf.

Jameel, M. K., Mustafa, M. A., Ahmed, H. S., Jassim Mohammed, A., Ghazy, H., Shakir, M. N., ... & Kianfar, E. (2024). Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. Results in Chemistry, 7, 101549.

https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101549

Lozano Rojas, M. F., & Sandoval Sandoval, E. M. (2024). La Biomasa como fuente de generación de energía eléctrica en el Ecuador: The Biomass as a source of electrical energy generation in Ecuador. Revista Científica Multidisciplinar G-Nerando, 5(1), 194–223.

https://doi.org/10.60100/rcmg.v5i1.189

Neches O. (2011). Agricultura: Energías Renovables. Análisis y diagnóstico. La biomasa, usos y aplicaciones, abril 11, 266-269. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_Agri%2FAgri_2011_939_266_269.pdf

Nsair, A., Onen Cinar, S., Alassali, A., Abu Qdais, H., & Kuchta, K. (2020). Operational parameters of biogas plants: A review and evaluation study. Energies, 13(15), 3761. https://doi.org/10.3390/en13153761

Kougias P.G., Treu L., Campanaro S., Zhu X., Angelidaki I., (2016) Dynamic functional characterization and phylogenetic changes due to Long Chain Fatty Acids pulses in biogas reactors, Sci. Rep. 6 (1) 28810. DOI: 10.1038/srep28810

Quesada, R., Salas, N., Arguedas, M., & Botero, R. (2007). Generación de energía eléctrica a partir de biogás. Tierra tropical, 3(2), 227-235.

Romanelli, P., Ruiz, M., & Pasquele, A. (s.f.) Química de la biomasa y los biocombustibles. Editorial de la Universidad de la Plata. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/download/676/647/2252-1&ved=2ahUKEwiV8qDA3c-IAxWJKkQIHc_6IZQQFnoECBUQAQ&usg=AOvVaw0-2J1ystuzB1kIAS8AUefl

Secretaria de energía [SENER] (2023). Anexo 3. Reporte de Avance de Energías Limpias (RAEL) https://base.energia.gob.mx/PRODESEN2023/Anexo3.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2018, 23 de julio). *Energías renovables, gran oportunidad para México*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/semarnat/articulos/energias-renovables-gran-oportunidad-para-mexico-172759

Varnero-Moreno, M. (2011). Manual de biogás. https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf

Velázquez-Martí, B. (2018). Aprovechamiento de la biomasa para uso energético. http://hdl.handle.net/10251/113122

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Comparison of Spectral Representation as Inputs in Multistream Convolutional Neural Networks for Musical Genre Classification

Guevara Pérez, Juan Alfredo * **Polanco Martagón, Said** *
Ortíz Moctezuma, Manuel Benjamín *

* *Universidad Politécnica de Victoria Av. Nuevas Tecnologías 5902, Parque Científico y Tecnológico de Tamaulipas, 87138 Cdad. Victoria, Tamps. (e-mail: 2439006, spolancom, mortizm@upv.edu.mx).*

Abstract: Music genre classification is an important subject in the field of Music Information Retrieval, with applications such as recommendation systems and automatic playlist generation in music streaming platforms. Despite extensive research in the field utilizing spectral representations for single-input convolutional neural networks, few studies systematically compare multiple spectral representations and their combination in CNN-based models. This work presents the development and evaluation of a convolutional neural network for musical genre classification using three different spectral representations: STFT, Mel spectrograms, and Wavelet transforms. The GTZAN dataset, consisting of 1,000 audio fragments 30 seconds in length each distributed across 10 musical genres, is utilized. Each fragment is separated into three-second segments, transformed into each of the three representations with an equivalent time scale to guarantee comparability. A multi-input CNN architecture was designed, where each branch utilizes one of the representations. Comparative studies were conducted across individual and combined input configurations using identical convolutional neural network branches to ensure fair comparison, and model performance was evaluated across 10 independent experiments for statistical reliability. Results show that the STFT offers the best performance, obtaining an average accuracy of 95.12%. The combined STFT + Wavelet model achieves the highest global performance with a maximum accuracy of 95.81%, demonstrating the potential for complementary input fusion. However, the combination of all three representations did not provide significantly improved results, suggesting redundancy or overfitting. These findings provide a systematic evaluation of the influence of the input representation in convolutional neural networks for the purpose of music information retrieval, and highlight the importance of input representation choice, showing that a correct fusion of complementary input representations can enhance model performance, but inappropriate combination may result in diminished performance.

Keywords: Convolutional Neural Networks, Musical Genre Classification, Deep Learning, Spectral Features, Feature Fusion.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a Schedl et al. (2014), la recuperación de información musical es un campo enfocado en extraer e inferir características significativas de la música, la categorización de música utilizando estas características, y el desarrollo de herramientas de búsqueda. En la epoca moderna, han crecido en importancia debido al auge de los servicios de *streaming* de música, los cuales han reemplazado las colecciones físicas de CDs y otras grabaciones (Hagen (2015)). Tradicionalmente, los métodos de clasificación de música se basan en en características extraídas manualmente a partir de señales digitales de audio (Downie (2003)). Sin embargo, el aprendizaje profundo ha impulsado las técnicas de clasificación de música a una nueva etapa de desarrollo, aprendiendo utilizando características obtenidas a partir de señales puras o de sus espectrogramas (Zhang (2021)).

Las redes neuronales convolucionales(CNNs) han sido utilizadas para la clasificación de géneros musicales debido a su habilidad para obtener características a partir de las representaciones en forma de espectrogramas (Choi et al. (2016)). A pesar de que se han realizado gran cantidad de investigaciones adaptando CNNs originalmente diseñadas para el reconocimiento de imágenes, se ha prestado menos atención a la influencia que tiene la representación de entrada el el desempeño de la clasificación (Purwins et al. (2019)). El sonido se puede transformar en distintas representaciones en el espacio del tiempo y la frecuencia, las cuales enfatizan diferentes aspectos particulares de la señal. Entre las mas utilizadas para la clasificación de señales de audio están la Transformada de Fourier en Tiempo Corto (STFT), los espectrogramas de Mel, y las transformadas Wavelet (Zhang (2021)).

La STFT provee una relación directa del contenido frecuencial de la señal de audio sobre el tiempo, preservando detalles finos en la señal. Los espectrogramas de Mel comprimen la información en el eje de la frecuencia utilizando la escala de Mel, con el objetivo de relacionar el contenido de la señal con la percepción humana del sonido. Las transformada Wavelet proveen un análisis de múltiple resolución, capturando información sobre sonidos transitorios y estructuras armónicas de mayor duración (Zhang et al. (2016)). Cada una de las representaciones enfatiza diferentes aspectos de la música, y la elección de entrada puede afectar de manera significativa el desempeño de los clasificadores basados en CNNs.

Estudios previos han demostrado resultados positivos utilizando redes neuronales convolucionales utilizando representaciones individuales (Pons et al. (2016)), sin embargo, una comparación sistemática de estas representaciones, así como una exploración sobre el potencial de complementar las representaciones al utilizar mas de una simultáneamente, permanece limitada. Ya que la música presenta patrones temporales y espectrales, combinar múltiples entradas puede permitir que los modelos capturen información complementaria que normalmente sería ignorada cuando se utiliza una sola representación (Lee et al. (2017)).

En este trabajo, se conduce un estudio comparativo de tres representaciones como entradas para la clasificación de géneros musicales basado en CNNs: STFT, espectrogramas de Mel, y transformadas Wavelet. Se evalúa el desempeño de una red neuronal convolucional sencilla entrenada por separado con cada representación, y se examinan modelos híbridos que incorporan múltiples entradas. El propósito de esta investigación es analizar el rol de las diferentes representaciones de entrada en el desempeño de los modelos basados en redes neuronales convolucionales para problemas de clasificación de audio. Los resultados proveen un mejor entendimiento de como la elección de la entrada afecta los modelos de aprendizaje profundo en el área de recuperación de información musical así como el potencial de utilizar una variedad de entradas para complementar los resultados obtenidos.

1.1 Trabajos Relacionados

El paso de las estrategias tradicionales de aprendizaje por computadora a el aprendizaje profundo ha marcado una gran diferencia el la clasificación de géneros musicales. Trabajos tempranos, como el de Tzanetakis and Cook (2002), se basaban en la extracción manual de características a través de técnicas como los coeficientes cepstrales de Mel, contraste cepstral, y características cromáticas como entradas a modelos de mezcla Gaussiana y maquinas de soporte vectorial. Estos avances fueron cruciales para demostrar la capacidad de las técnicas de aprendizaje por computadora de llevar a cabo la extracción de información musical, pero dependían de características diseñadas de manera manual por expertos en el campo.

El crecimiento del aprendizaje profundo, en particular las redes neuronales convolucionales, revolucionaron el campo al abrir la posibilidad de obtener características a partir de representaciones espectrales. Este acercamiento trata el problema de clasificación de audio como una tarea de reconocimiento de imágenes, utilizando los espectrogramas como las imágenes de entrada. Numerosos estudios han demostrado la eficacia de este paradigma, por ejemplo, se han obtenido fuertes resultados utilizando los espectrogramas de Mel como entrada única a varias arquitecturas de redes neuronales convolucionales, desde modelos sencillos (Pons et al. (2016)) hasta redes híbridas complejas(Choi et al. (2016)). Similarmente, la transformada de Fourier en tiempo corto (STFT) ha sido utilizada gracias a su resolución detallada en tiempo-frecuencia, lo que proporciona una base efectiva para la extracción de características en modelos de aprendizaje profundo (Zhang (2021)).

Recientemente, se ha explorado el potencial arquitecturas multimodales y multi-entrada para capturar un conjunto mas completo de características. Lee et al. (2017) fusionan características obtenidas a partir de formas de onde de audio en bruto con características obtenidas de representaciones espectrales. Otros trabajos, como el de Costa et al. (2017) han experimentado con combinar diferentes tipos de espectrogramas, como la transformada de Q constante (CQT) y espectrogramas de Mel, para aprovechar sus ventajas complementarias al capturar la información frecuencial e información del timbre de la música, respectivamente.

Sin embargo, a pesar de estos avances, existe la falta de una comparación sistemática del desempeño de la STFT, los espectrogramas de Mel, y las transformadas Wavelet en una arquitectura controlada e idéntica para aislar el impacto de la representación de entrada. Este trabajo busca proporcionar un análisis comparativo directo que determine las ventajas individuales de cada representación espectral como entrada y el potencial complementario entre las representaciones fundamentales para la clasificación de géneros musicales, con el propósito de demostrar la significancia de la elección de entrada para el uso de redes neuronales convolucionales en problemas de clasificación de audio, así como el valor de la fusión de características para la mejora del desempeño de clasificación.

2. METODOLOGÍA

2.1 Dataset

Los experimentos se realizaron utilizando el dataset GTZAN desarrollado por George Tzanetakis, el cual es uno de los datasets mas utilizados para la evaluación de clasificadores de géneros musicales (Sturm (2012)). El dataset consiste de 1,000 archivos de audio cada uno con 30 segundos de duración, distribuidos uniformemente en 10 clases: *Blues, Classical, Country, Disco, Hip-Hop, Jazz, Metal, Pop, Reggae* y *Rock*. Todos los archivos estan muestreados a 22,050Hz en un único canal monoaural. Se realizó una separación de entrenamiento/prueba/validación de 70:15:15.

2.2 Preprocesamiento

Los archivos de audio fueron separados en 10 secciones de 3 segundos cada una, resultando en un total de 10,000 muestras distintas. Los fragmentos de audio resultantes se transformaron en tres representaciones tiempo-frecuencia diferentes utilizando la librerias librerías *librosa* y *PyWavelets*:

- Se obtiene la transformada de Fourier en tiempo corto (STFT) usando una ventana de 2048 muestras y un tamaño de salto de 512 muestras, resultando en espectrogramas con una resolución temporal de 130 cuadros por segmento de 3 segundos. Se convierte la amplitud en decibelios tomando como referencia la magnitud máxima, y no se aplica normalización adicional (Figura 1, superior).
- Se calculan los espectrogramas de Mel usando las mismas características que la STFT, obteniendo la misma resolución temporal. Se convierte la potencia en decibelios tomando como referencia la potencia máxima, y no se aplica normalización adicional. Se utilizan 128 bandas de Mel (Figura 1, central).
- Se obtiene usando la transformada wavelet continua(CWT) con la wavelet de Morlet, con 32 escalas. Los coeficientes resultantes fueron normalizados entre 0 y 1, y submuestreados para igualar la resolución temporal de la STFT y los espectrogramas de Mel. La magnitud fue escalada a [0,1] usando normalización mínimo-máximo (Figura 1, inferior).

De esta forma, las tres representaciones tienen una resolución temporal consistente, lo que facilita el entrenamiento tanto para los modelos de una entrada así como los modelos de múltiple entrada. En la figura 1 se muestra un ejemplo de cada una de las representaciones obtenidas. En la tabla 1 se muestran las dimensiones de los tensores obtenidos.

Tabla 1. Dimensiones de los tensores de entrada a partir de cada representación espectral.

Representación	Dimensiones del Tensor
STFT	$1025 \times 130 \times 1$
Espectrograma de Mel	$128 \times 130 \times 1$
Transformada Wavelet	$32 \times 130 \times 1$

2.3 Configuraciones de ablación

Para examinar de forma sistemática la contribución de cada representación espectral, se llevo a cabo un estudio de ablación a nivel de entrada. Se evaluaron siete configuraciones experimentales fueron evaluadas con la misma arquitectura de red neuronal convolucional y condiciones de entrenamiento para aislar la influencia de la representación de entrada. Las configuraciones fueron las siguientes:

(1) Transformada de Fourier en Tiempo Corto
(2) Espectrograma de Mel unicamente
(3) Transformada Wavelet únicamente
(4) STFT + Mel
(5) STFT + Wavelet
(6) Mel + Wavelet
(7) STFT + Mel + Wavelet

Cada configuración fue entrenada y evaluada de manera independiente bajo condiciones de hiperparámetros idénticas. Este diseño permite una comparación controlada de las contribuciones individuales y combinadas de cada representación al desempeño del modelo.

2.4 Modelo

Para evaluar el impacto de las entradas, se implemento una red neuronal convolucional sencilla. El modelo se

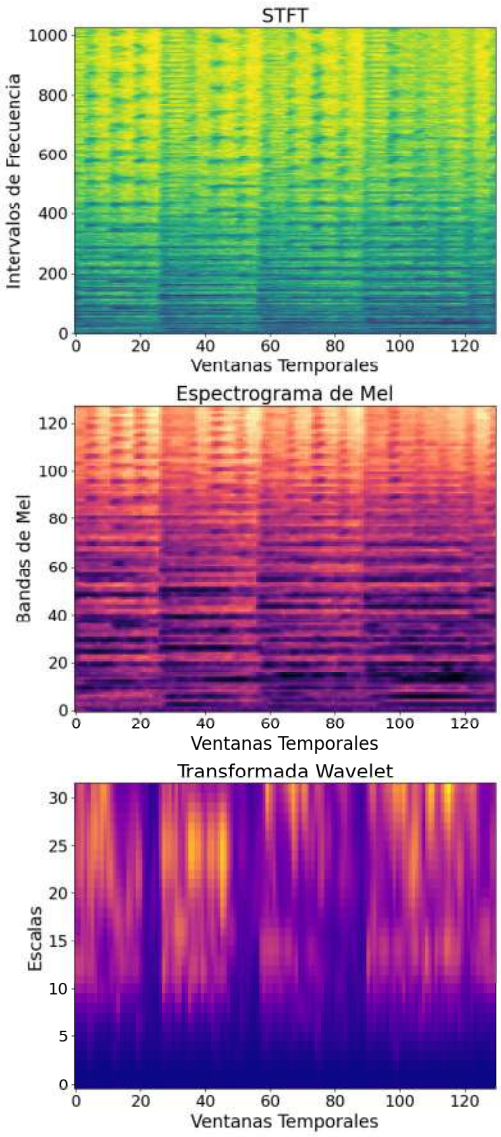


Fig. 1. Comparación de la STFT, espectrograma de Mel, y transformada Wavelet de una misma muestra.

diseñó para aceptar tres entradas independientes, correspondiendo a la STFT, los espectrogramas de Mel, y las transformadas wavelet. Cada rama sigue una estructura idéntica, compuesta de tres bloques convolucionales bidimensionales, cada uno seguido de una capa de *pooling* por valor máximo. Los bloques convolucionales usan 32, 64 y 128 filtros respectivamente, con un tamaño de kernel de 3x3. Finalmente, se aplica una capa de *pooling* promedio global para convertir los mapas de características en vectores de características compactos.

A las salidas de cada una de las ramas se les aplica una concatenación, la cual se da como entrada a una capa densa de 128 unidades, seguida de una capa de abandono con una tasa de 0.3 para reducir el sobreajuste. La capa de clasificación final es una capa densa *softmax*, en la cual el número de unidades corresponde al número de géneros a clasificar. En la figura 2 se observa la arquitectura del modelo de tres entradas, mientras que la tabla 2 muestra

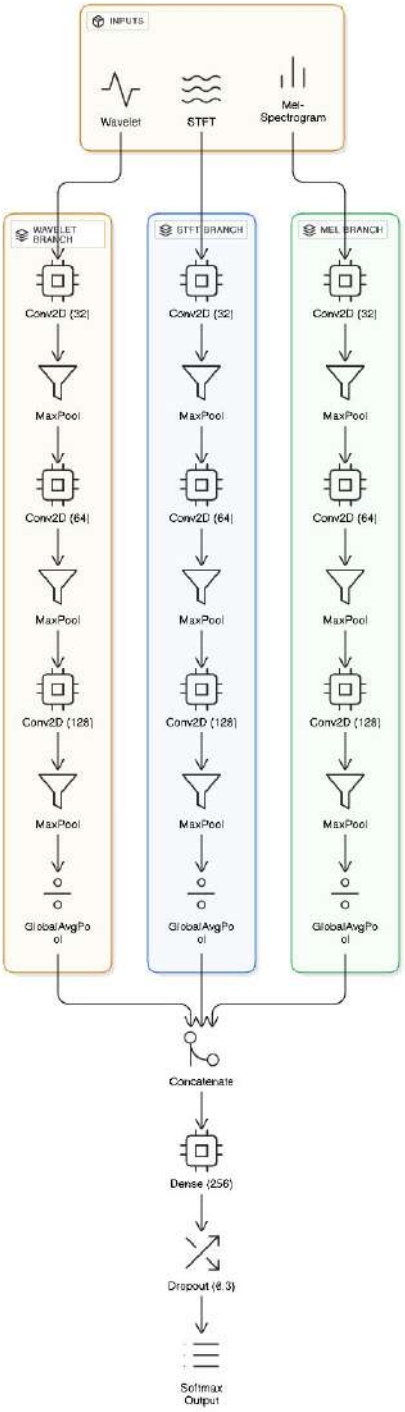


Fig. 2. Arquitectura del modelo de tres entradas.

a detalle el número de filtros, función de activación, y tamaño de kernel para cada capa.

Para los experimentos con menos de tres entradas, se utilizó la misma arquitectura, deshabilitando las ramas no utilizadas. Esto permitió una comparación consistente entre todos los experimentos, asegurando que las diferencias en el desempeño se pueden atribuir solamente a la diferencia en la entrada. El modelo se entreno utilizando

Tabla 2. Arquitectura del modelo CNN con tamaños de filtro y funciones de activación

Capa	Dimensiones de Salida	Filtros / Kernel	Activación
Input (STFT)	(None,1025,130,1)	–	–
Input (Mel)	(None,128,130,1)	–	–
Input (Wavelet)	(None,32,130,1)	–	–
Conv2D (STFT)	(None,1025,130,32)	32 / (3×3)	ReLU
MaxPooling2D	(None,512,65,32)	(2×2)	–
Conv2D (STFT)	(None,512,65,64)	64 / (3×3)	ReLU
MaxPooling2D	(None,256,32,64)	(2×2)	–
Conv2D (STFT)	(None,256,32,128)	128 / (3×3)	ReLU
MaxPooling2D	(None,128,16,128)	(2×2)	–
GlobalAvgPool2D	(None,128)	–	–
Conv2D (Mel)	(None,128,130,32)	32 / (3×3)	ReLU
MaxPooling2D	(None,64,65,32)	(2×2)	–
Conv2D (Mel)	(None,64,65,64)	64 / (3×3)	ReLU
MaxPooling2D	(None,32,32,64)	(2×2)	–
Conv2D (Mel)	(None,32,32,128)	128 / (3×3)	ReLU
MaxPooling2D	(None,16,16,128)	(2×2)	–
GlobalAvgPool2D	(None,128)	–	–
Conv2D (Wavelet)	(None,32,130,32)	32 / (3×3)	ReLU
MaxPooling2D	(None,16,65,32)	(2×2)	–
Conv2D (Wavelet)	(None,16,65,64)	64 / (3×3)	ReLU
MaxPooling2D	(None,8,32,64)	(2×2)	–
Conv2D (Wavelet)	(None,8,32,128)	128 / (3×3)	ReLU
MaxPooling2D	(None,4,16,128)	(2×2)	–
GlobalAvgPool2D	(None,128)	–	–
Concatenate	(None,384)	–	–
Dense	(None,256)	256 / –	ReLU
Dropout (0.3)	(None,256)	–	–
Dense (Output)	(None,10)	10 / –	Softmax
Total de parametros: 379,146			

el optimizador Adam con una función objetivo de entropía cruzada categórica y la accuracy como la medida de evaluación. Se utilizó un tamaño de lote de 32 y se entrenó hasta un máximo de 100 épocas, aplicando *early stopping*. La tasa de aprendizaje inicial es de .001, y se utilizó la función *ReduceLROnPlateau* para reducir la tasa en caso de que el desempeño se estancara.

2.5 Entorno de Computación

Todos los experimentos, incluyendo el preprocesamiento, así como el entrenamiento y evaluación de los modelos, se llevaron a cabo bajo el siguiente entorno de hardware:

- CPU: AMD Ryzen 5 4600H
- RAM: 16GB DDR4
- GPU: NVIDIA GTX 1660Ti

Se utilizaron las librerías de Python *TensorFlow* y *Keras* para la implementación y entrenamiento de la red neuronal, y las librerías *librosa* y *PyWavelets* para el preprocesamiento de audio.

3. RESULTADOS

Los experimentos se realizaron 10 veces de manera independiente para cada uno de las configuraciones de entrada para el modelo. Para proporcionar resultados representativos, se excluye de los cálculos para el promedio y desviación estándar casos claramente aislados, calculados como aquellos valores encontrados a más de 1.5 veces el rango intercuartílico por debajo del percentil 25 o por encima del percentil 75.

3.1 Análisis Cuantitativo del Desempeño

Se presentan los resultados en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen del desempeño del modelo para diferentes representaciones de entrada.

Entrada	Accuracy promedio	Precisión promedio	Recall promedio	F1-score promedio
STFT	0.9507 ± 0.0035	0.9512 ± 0.0036	0.9504 ± 0.0037	0.9501 ± 0.0037
STFT + Wavelet	0.9489 ± 0.0064	0.9490 ± 0.0068	0.9486 ± 0.0068	0.9486 ± 0.0069
STFT + Mel + Wavelet	0.9488 ± 0.0066	0.9488 ± 0.0069	0.9486 ± 0.0068	0.9486 ± 0.0068
STFT + Mel	0.9440 ± 0.0064	0.9444 ± 0.0064	0.9440 ± 0.0064	0.9440 ± 0.0065
Mel + Wavelet	0.9190 ± 0.0092	0.9192 ± 0.0091	0.9159 ± 0.0091	0.9154 ± 0.0091
Mel	0.9167 ± 0.0112	0.9164 ± 0.0112	0.9129 ± 0.0111	0.9113 ± 0.0112
Wavelet	0.7374 ± 0.0125	0.7346 ± 0.0128	0.7356 ± 0.0128	0.7343 ± 0.0131

Entre los modelos de una sola entrada, el que usa solo la STFT obtuvo el resultado mas alto, con una accuracy promedio de 95.1%. Después de remover un caso aislado, el modelo que utiliza la STFT y la transformada Wavelet en conjunto obtiene un desempeño promedio similar, y alcanza el mejor desempeño de todos los experimentos con un 95.81%. La configuración de tres entradas alcanza un desempeño promedio similar (94.9%) pero no alcanza un valor máximo superior.

3.2 Significancia estadística y niveles de desempeño

Se llevo a cabo un análisis de la varianza(ANOVA) a través de los promedios de las 10 pruebas para las siete configuraciones, obteniendo una F de 896.25 y un valor p de 5.40×10^{-59}. Este resultado confirma con certeza la existencia de diferencias estadísticamente significativas en el desempeño entre las configuraciones de entrada.

Acto seguido, se llevo a cabo una prueba de Tukey para determinar las relaciones entre los promedios de los grupos, la cual se puede observar en la tabla 4. A partir de los resultados se pueden observar tres niveles:

(1) Nivel de alto desempeño No encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los cuatro modelos de mejor desempeño: STFT única, STFT + Wavelet, STFT + Mel, y STFT + Mel + Wavelet. Esto indica que, en promedio, las estrategias de multiple entrada no obtienen un mejor desempeño que la entrada STFT única.
(2) Nivel de medio desempeño Los modelos Mel único y Mel + Wavelet fueron estadísticamente equivalentes, formando un nivel medio claramente definido.
(3) Nivel de bajo desempeño El modelo Wavelet único demostró ser estadísticamente inferior a todas las demás configuraciones probadas, obteniendo un $p\text{-}adj < 0.5$ en todas las comparaciones.

3.3 Desempeño máximo y comparación visual

Si bien los promedios de certeza de los mejores modelos son estadísticamente equivalentes, el modelo STFT + Wavelet alcanzó el mejor resultado de clasificación individual entre todos los experimentos, con una certeza máxima de 95.81%. Este resultado, ligeramente superando el desempeño máximo de la STFT única (95.76%) sugiere un potencial para la extracción de características complementaria en los escenarios del mejor desempeño.

En contraste, la configuración de entrada triple STFT + Mel + Wavelet, a pesar de su equivalencia estadística en certeza promedio, no alcanzó el desempeño máximo de la entrada única ni la fusión de doble entrada, lo que sugiere redundancia o dilución de las características introducida por la inclusión del espectrograma de Mel.

Los promedios de certeza y la certeza máxima obtenida se pueden observar en la figura 3.

4. DISCUSIÓN

La comparación sistemática de las representaciones espectrales en arquitectura de una y multiples entradas ha resultado en varios hallazgos importantes respecto a su influencia al desempeño de redes neuronales convolucionales para la clasificación de géneros musicales. El análisis estadístico confirmó la existencia de tres niveles distintos de desempeño, lo cual permite realizar una interpretación del rol que cada representación juega en la extracción de características.

4.1 Análisis de las representaciones espectrales individuales

Los resultados establecen a la transformada de Fourier en tiempo corto como la representación espectral optima única, alcanzando un promedio de certeza de 95.07%, estadísticamente equivalente a los mejores modelos de multiple entrada. Este desempeño superior se debe a la alta resolución espectral lineal proporcionada por la STFT. Este detalles es de crucial importancia para captar estructuras armónicas finas y características relacionadas al timbre que principalmente definen a los géneros musicales.

En contraste, el desempeño de otras entradas únicas confirmó sus limitaciones. La certeza promedio del modelo entrenado únicamente con espectrogramas de Mel fue de 91.67%, significativamente mas bajo que la STFT. Si bien la escala de Mel se alinea con la percepción humana del sonido, la compresión logarítmica de los espectros de alta frecuencia parece descartar detalles significativos que la red neuronal puede utilizar para la clasificación.

El modelo entrenado solamente en las transformadas Wavelet dio el desempeño mas bajo, alcanzando un promedio de solo 73.61%. Esto sugiere que, mientras que las transformadas Wavelet son excelentes para capturar información espectral local, carecen del contexto armónico global requerido para llevar a cabo la clasificación de géneros musicales al usarse por si solas.

4.2 Fusión de características y complementariedad

El modelo que combina la STFT y Wavelet alcanzó la accuracy máxima entre todos los experimentos(95.81%), validando la hipótesis de la complementariedad de características. La entrada de bajo desempeño Wavelet, al fusionarse con la entrada de alto desempeño STFT, provee

Tabla 4. Comparación múltiple de promedios – Tukey HSD, Tasa de Error Familiar (FWER) = 0.05

Grupo 1	Grupo 2	Diff. de Promedio	P-Adj	Limite Inferior	Limite Superior	Rechazar hipótesis nula
Mel	Mel+Wavelet	0.0062	0.6330	-0.0050	0.0173	Falso
Mel	STFT	0.0389	0.0000	0.0278	0.0501	Verdadero
Mel	STFT+Mel	0.0326	0.0000	0.0214	0.0438	Verdadero
Mel	STFT+Mel+Wavelet	0.0366	0.0000	0.0254	0.0478	Verdadero
Mel	STFT+Wavelet	0.0371	0.0000	0.0259	0.0483	Verdadero
Mel	Wavelet	-0.1761	0.0000	-0.1873	-0.1649	Verdadero
Mel+Wavelet	STFT	0.0328	0.0000	0.0216	0.0440	Verdadero
Mel+Wavelet	STFT+Mel	0.0265	0.0000	0.0153	0.0376	Verdadero
Mel+Wavelet	STFT+Mel+Wavelet	0.0305	0.0000	0.0193	0.0416	Verdadero
Mel+Wavelet	STFT+Wavelet	0.0309	0.0000	0.0197	0.0421	Verdadero
Mel+Wavelet	Wavelet	-0.1823	0.0000	-0.1935	-0.1711	Verdadero
STFT	STFT+Mel	-0.0063	0.6061	-0.0175	0.0049	Falso
STFT	STFT+Mel+Wavelet	-0.0023	0.9954	-0.0135	0.0089	Falso
STFT	STFT+Wavelet	-0.0019	0.9986	-0.0131	0.0093	Falso
STFT	Wavelet	-0.2151	0.0000	-0.2262	-0.2039	Verdadero
STFT+Mel	STFT+Mel+Wavelet	0.0040	0.9298	-0.0072	0.0152	Falso
STFT+Mel	STFT+Wavelet	0.0044	0.8876	-0.0067	0.0156	Falso
STFT+Mel	Wavelet	-0.2087	0.0000	-0.2199	-0.1976	Verdadero
STFT+Mel+Wavelet	STFT+Wavelet	0.0005	1.0000	-0.0107	0.0116	Falso
STFT+Mel+Wavelet	Wavelet	-0.2127	0.0000	-0.2239	-0.2015	Verdadero
STFT+Wavelet	Wavelet	-0.2132	0.0000	-0.2244	-0.2020	Verdadero

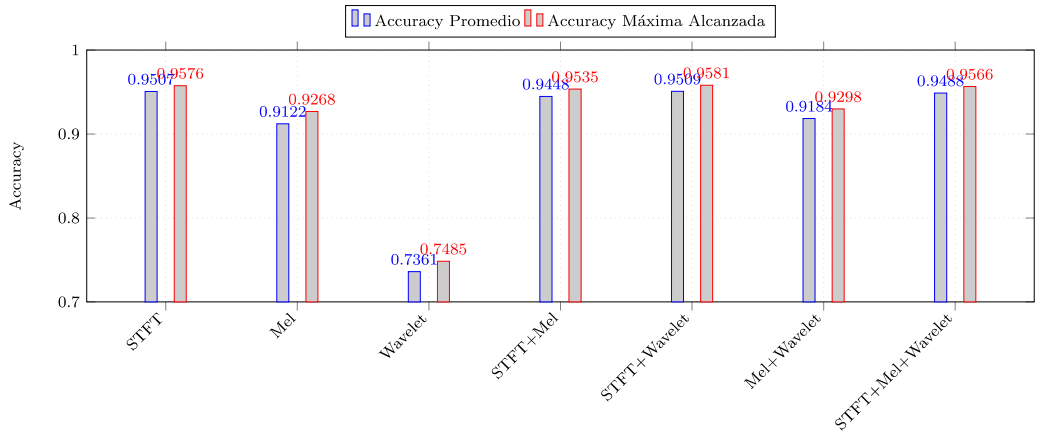


Fig. 3. Comparación del promedio y valores mas altos alcanzados en accuracy por configuración de entrada.

información única relacionada a los transitorios rítmicos y percusión. Esta información especializada ayuda al modelo a corregir errores de clasificación en casos específicos y difíciles de categorizar, impulsando el desempeño máximo posible. Sin embargo, la prueba Tukey HSD determinó que la certeza promedio de la fusión STFT + Wavelet no fue significativamente distinta a la del modelo de STFT única($p\text{-}adj = .9986$). Este hallazgo significa que mientras que la fusión de características ofrece potencial para mejorar el desempeño, no garantiza una mejora estadística robusta.

El desempeño de la red entrenada con la combinación de las tres entradas STFT + Mel + Wavelet demostró el problema de la redundancia. El modelo fue estadísticamente idéntico a la STFT única y no logró impulsar la certeza máxima. Este resultado sugiere que los espectrogramas de Mel introdujeron información altamente correlacionada y redundante al espacio de características.

Para comprobar esta hipótesis, se llevo a cabo a cabo un análisis estadístico de covarianza cruzada, correlación, y alineación entre los espacios de características para comprobar la ortogonalidad de las características introducidas por cada representación. Se pueden observar los resultados en la tabla 5, la cual demuestra que la STFT y los espectrogramas de Mel son espacios de características colineales con alta correlación. Ya que los espectrogramas de Mel están basados en la transformada de Fourier en tiempo corto, la rama de la entrada de espectrogramas de Mel no contribuyó características únicas. Esto fuerza al modelo a aprender sobre un vector de características innecesariamente complejo, lo que lleva a la dilución de características o sobreajuste. Estos resultados enfatizan la necesidad de priorizar la combinación de características ortogonales.

4.3 Trabajo a futuro

Utilizar la misma arquitectura en las tres ramas para cada una de las características aseguró que los resultados se pudiera aislar las diferencias en el desempeño a las distintas configuraciones de entrada, pero pudo haber limitado el potencial del modelo. Las entradas Wavelet y Mel pueden necesitar arquitecturas con filtros mas pequeños para tener resultados mas efectivos.

Además, el trabajo se limitó al dataset GTZAN, el cual es usado ampliamente pero es relativamente pequeño. Se

Tabla 5. Comparación estadística cruzada entre los espacios de características.

Comparación	Valores singulares principales	Correlación canónica	CKA Lineal
STFT vs Mel	[4244310.5, 1206677.6, 1146522.0, 724253.2, 553288.7]	0.9889	0.8610
STFT vs Wavelet	[1210860.9, 660845.4, 336305.22, 290656.12, 168509.52]	0.8400	0.3460
Mel vs Wavelet	[590025.3, 281486.25, 173483.53, 123252.31, 67545.87]	0.8455	0.4560

debe validar en trabajo a futuro los hallazgos en datasets mas grandes, como el dataset *Free Music Archive*. Finalmente, se deben explorar estrategias de fusión de características optimizadas como los mecanismos de atención para variar dinámicamente las contribuciones de las ramas durante el entrenamiento.

5. CONCLUSIONES

Este articulo exploró y comparó el desempeño de las representaciones tiempo-frecuencia obtenidos de los mismos segmentos de audio del dataset GTZAN para la clasificación de géneros musicales. Se evaluaron la STFT, los espectrogramas de Mel, y las transformadas Wavelet en arquitecturas de entrada individual, doble, y triple.

Entre las arquitecturas de una sola entrada, se obtuvieron los mejores resultados utilizando la STFT. Al combinar representaciones, el modelo que combina la STFT con las transformadas Wavelet logró superar el resultado mas alto obtenido por la STFT individualmente, a pesar del bajo desempeño obtenido por la transformada Wavelet de manera individual. Esto sugiere la naturaleza multi-escala de la transformada Wavelet puede aportar información que la STFT no puede proporcionar individualmente, a pesar de que esta información no logra obtener resultados altos por si sola. La inclusión de las tres representaciones no mejoró la certeza debido a la colinealidad de la STFT con los espectrogramas de Mel. Estos resultados demuestran que los modelos de múltiples entradas pueden superar a los modelos tradicionales de única entrada cuando se combinan las entradas de manera adecuada, pero pueden disminuir los resultados si la fusión de entradas no aporta características ortogonales al modelo.

REFERENCIAS

Choi, K., Fazekas, G., Sandler, M., and Cho, K. (2016). Convolutional recurrent neural networks for music classification. (arXiv:1609.04243). doi:10.48550/arXiv.1609.04243. URL `http://arxiv.org/abs/1609.04243`. ArXiv:1609.04243 [cs].

Costa, Y.M.G., Oliveira, L.S., and Silla, C.N. (2017). An evaluation of convolutional neural networks for music classification using spectrograms. *Applied Soft Computing*, 52, 28–38. doi:10.1016/j.asoc.2016.12.024.

Downie, J.S. (2003). Music information retrieval. *Annual Review of Information Science and Technology*, 37(1), 295–340. doi:10.1002/aris.1440370108.

Hagen, A.N. (2015). The playlist experience: Personal playlists in music streaming services. *Popular Music and Society*, 38(5), 625–645. doi:10.1080/03007766.2015.1021174.

Lee, J., Park, J., Kim, K.L., and Nam, J. (2017). Sample-level deep convolutional neural networks for music auto-tagging using raw waveforms. (arXiv:1703.01789). doi:10.48550/arXiv.1703.01789. URL `http://arxiv.org/abs/1703.01789`. ArXiv:1703.01789 [cs].

Pons, J., Lidy, T., and Serra, X. (2016). Experimenting with musically motivated convolutional neural networks. In *2016 14th International Workshop on Content-Based Multimedia Indexing (CBMI)*, 1–6. IEEE, Bucharest, Romania. doi:10.1109/CBMI.2016.7500246. URL `http://ieeexplore.ieee.org/document/7500246/`.

Purwins, H., Li, B., Virtanen, T., Schlüter, J., Chang, S.y., and Sainath, T. (2019). Deep learning for audio signal processing. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 13(2), 206–219. doi:10.1109/JSTSP.2019.2908700. ArXiv:1905.00078 [cs].

Schedl, M., Gómez, E., and Urbano, J. (2014). Music information retrieval: Recent developments and applications. *Foundations and Trends® in Information Retrieval*, 8(2–3), 127–261. doi:10.1561/1500000042.

Sturm, B.L. (2012). A survey of evaluation in music genre recognition. In *Adaptive Multimedia Retrieval: Semantics, Context, and Adaptation: 10th International Workshop, AMR 2012, Copenhagen, Denmark, October 24-25, 2012, Revised Selected Papers*, 29–66. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-319-12093-5_2. URL `https://doi.org/10.1007/978-3-319-12093-5\_2`.

Tzanetakis, G. and Cook, P. (2002). Musical genre classification of audio signals. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 10(5), 293–302. doi:10.1109/TSA.2002.800560.

Zhang, J. (2021). Music feature extraction and classification algorithm based on deep learning. *Scientific Programming*, 2021(1), 1651560. doi:10.1155/2021/1651560.

Zhang, W., Lei, W., Xu, X., and Xing, X. (2016). Improved music genre classification with convolutional neural networks. In *Interspeech 2016*, 3304–3308. ISCA. doi:10.21437/Interspeech.2016-1236. URL `https://www.isca-archive.org/interspeech_2016/zhang16h_interspeech.html`.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Implementation of algorithms for data extraction and classification in electrocardiograms

Urbina-Brito, Norberto*. **Sánchez-González, Roberto Alejandro. ***Ortiz-Cortés, Lourdes Yaret+

** Ingeniería Biomédica, Universidad Politécnica de Chiapas, Carretera Tuxtla Gutiérrez- Portillo Zaragoza Km 21+500, Las Brisas, 29150 Suchiapa, Chiapas, México USA (Tel: 303-555-5555; e-mail: norberto.urbinab@gmail.com).*

*** Laboratorio de Investigación, Hospital Regional de Alta Especialidad Ciudad Salud, Servicios de Salud del Instituto Mexicano del Seguro Social para el Bienestar (IMSS-BIENESTAR) Carretera Tapachula Puerto Madero S/N km. 15 + 200, Carretera Federal 225, Col. Los Toros, 30830 Chiapas, México (e-mail: roasago@gmail.com)*

**** Escuela de Ciencias Químicas Bénemerita Universidad Autónoma de Chiapas, Carretera panamericana Ocozocoautla - Cintalapa Km. 2.5, 29140 Ocozocoautla, Chiapas, México (e-mail: mc.yaret.ortiz@gmail.com)*

+Address correspondence to E-mail: mc.yaret.ortiz@gmail.com

Abstract: The electrocardiogram (ECG or EKG) is a representation of the result of noninvasive electrical monitoring of the heart. According to the World Health Organization (WHO), cardiovascular diseases are the leading cause of death worldwide; however, despite the clinical importance of the ECG, a large part of the reports are stored in multiple formats, such as scanned documents, PDF, or digitized images. This represents a limitation for performing automated analysis and exploiting large volumes of information. In this context, the development and implementation of algorithms capable of automatically extracting information and structuring it in databases that allow for classification is essential. For this reason, the general objective of this work was the implementation of an algorithm for data extraction and clinical classification of electrocardiograms. An algorithm was implemented to analyze the ECGs of 19 patients in the municipality of San Cristóbal de las Casas, aged 0 to 60 years. The results indicated that the main cardiovascular alerts were tachycardia, bradycardia, right axis deviation, left axis deviation, first-degree atrioventricular block (AVB I), ventricular extrasystoles (VE), and supraventricular extrasystoles (SVE). The occurrence of these alerts was associated with the age and sex of the participants.

Keywords: electrocardiogram, algorithm, Chiapas, cardiovascular events.

1. INTRODUCTION

The electrocardiogram (ECG or EKG) is a representation of the result of noninvasive electrical monitoring of the heart. This has a highly positive impact on cardiovascular diseases because it is used to monitor patients with antiarrhythmic events. It also allows for screening of people who may be at high risk and is also used as a tool in surveillance research and experimental trials of drugs with unrecognized cardiac effects (Surawicz et al., 2009; Rundo et al., 2018).

According to the World Health Organization (WHO), cardiovascular diseases are the leading cause of death worldwide. It is estimated that in 2022, approximately 19.8 million (32%) people died from a cardiovascular event. The main factors that have been associated with this are unhealthy diet, physical inactivity, tobacco use, harmful use of alcohol, and environmental factors.

In addition, people with the highest risk percentage are those with comorbidities such as high blood pressure, uncontrolled blood glucose and lipid levels, overweight, and obesity (Fox et al., 2016; Benjamin et al., 2018).

However, despite the clinical importance of the ECG, many reports are stored in multiple formats, such as scanned documents, PDFs, or digital images. This represents a limitation for performing automated analysis and for the exploitation of large volumes of information. In this context, the development and implementation of algorithms capable of automatically extracting information and structuring it in databases that allow for classification is essential (Mitra and Mitra, 2003; Wu et al., 2022).

Recent research has demonstrated the impact of digitalization and automatic extraction of ECG information for the detection of clinical patterns, population monitoring and support in medical decisions with the help of intelligent systems (Wu et al., 2022; Wang et al., 2024; Lence et al., 2024). Similarly, robust methodologies have been described in the extraction of features from ECG signals, which influence statistical approaches, deep learning models and mathematical

transforms, strengthening a solid methodological framework for quantitative validation (Singh and Krishnan, 2023).

Some of the most common cardiovascular events are tachycardia, bradycardia, right axis deviation, left axis deviation, first-degree atrioventricular block (AVB I), ventricular extrasystoles (VE), and supraventricular extrasystoles (SVE).

Tachycardia is defined as a heart rate greater than 100 beats per minute at rest. It is characterized by the heart beating rapidly but maintaining a normal rhythm. Tachycardia can be caused by exercise, fever, anxiety, pain, anemia, dehydration, hyperthyroidism, or caffeine/stimulant consumption (Almuhanna et al., 2021; Vernino et al., 2021; Della Bella eta al., 2022). In contrast, bradycardia is a decrease in heart rate below 60 beats per minute at rest. People with this condition experience dizziness or vertigo, extreme fatigue, exercise intolerance, confusion or memory loss, fainting, and in severe cases, cardiac arrest (Attena et al., 2021; Touafchia et al., 2021; Battaglia et al., 2024).

The deviation of the electrical axis of the right heart is evident when the QRS electrical axis is deviated towards more positive values in the central plane (+90° and +180°). Its main causes are right ventricular hypertrophy, right bundle branch block, left posterior fascicular block, chronic lung disease, and congenital heart disease. (Seko eta l., 2021; Bacharova, 2022; Lui et al., 2022). While the deviation of the left heart electrical axis is shown when the values in the central plane are -30° and -90°. The most frequent causes are left anterior fascicular block, left bundle branch block, left ventricular hypertrophy due to chronic arterial hypertension, aortic stenosis, mitral regurgitation, inferior wall infarction, and ischemic heart disease (Van der Ree eta al., 2021; Ponnusamy y Vijayaraman, 2022; Calò et al., 2023).

Meanwhile, first-degree atrioventricular block is a disorder of electrical conduction in the heart where impulses from the sinus node reach the ventricles with a delay. It usually occurs in athletes or in people with myocardial ischemia and myocarditis (Tanaka et al., 2021; Tang et al., 2021; Liu et al., 2022).

Ventricular extrasystoles are a common type of cardiac arrhythmia; they are characterized by an early heartbeat originating in the ventricles. The main causes are stress, anxiety, caffeine, alcohol, and tobacco consumption, and lack of sleep. It can also occur in people with ischemic heart disease, cardiomyopathies, high blood pressure with cardiac repercussions, and electrolyte disturbances (Lönnrot et al., 2023; Kunigeliene et al., 2024; Costa et al., 2025). In addition, supraventricular ectopics are premature beats originating in the atria or atrioventricular junction, earlier than expected in the abnormal rhythm. Those who suffer from this condition are mostly people with structural heart disease, metabolic and electrolyte disorders, and hyperthyroidism (Timmers et al., 2022; Uusitalo et al., 2022; Diaconu et al., 2025).

Due to the importance of ECGs in the diagnosis of cardiovascular diseases, we analyzed the information of 19 patients from the municipality of San Cristobal de las Casas, Chiapas, Mexico, through the implementation of an algorithm for data extraction and clinical classification of electrocardiograms

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Review stage

Please use this document as a template to prepare your manuscript. For submission guidelines, follow instructions on the paper submission system as well as the conference website.

Note that conferences impose strict page limits, so it will be better for you to prepare your initial submission in the camera-ready layout so that you will have a good estimate for the paper length. Additionally, the effort required for final submission will be minimal.

Study design

This work corresponds to an observational and descriptive in silico design, aimed at developing and evaluating a pilot test for the automated extraction of clinical data from electrocardiogram (ECG) reports in PDF format. The general objective was to generate a computational tool capable of structuring the information contained in these reports, classifying electrocardiographic events, and producing visualizations that facilitate clinical and epidemiological analysis.

Population and data source

The data were obtained from 19 clinical electrocardiogram (ECG) reports from the municipality of San Cristóbal de las Casas, Chiapas, Mexico. The reports included basic information (name, sex, age, date and equipment serial number), electrocardiographic parameters (HR, PR, QRS, QT, QTc, P/QRS/T axes) and medical interpretation data.

The files were anonymized and processed in digital format without modifying their original content.

Environment and tools

- The processing was implemented in Python 3.x, using the following libraries:
- PyMuPDF (fitz): extracting text from PDF files.
- pandas y numpy: data structuring and analysis.
- matplotlib: generation of graphs and visualizations.
- tkinter: development of the graphical user interface (GUI).

The system allows you to add PDF files using buttons, process them automatically, view results and export the generated tables and graphs.

Procedure

The methodological process was divided into four main stages:

2.1. Data extraction and structuring

- Each PDF file was processed using an algorithm that:

- Read the full text with fitz.open().
- Identify patterns using regular expressions (re.search) to locate key fields such as name, sex, age, date, HR, PR, QRS, QT, QTc, cardiac axes and number of heartbeats (Total Beats, Normal Beats, SVE, VE).
- Removes units and non-numeric characters using cleanup functions (_clean_num, _clean_int, _strip_units).

Structure the data in a DataFrame with the columns: file, name, sex, age, date_time, sn,

total_beats, normal_beats, sve, ve,

hr_bpm, hr_flag, pr_ms, qrs_ms, qt_ms, qtc_ms, t_ms,

p_axis_deg, qrs_axis_deg, t_axis_deg, axis_flag,

rv5_mv, sv1_mv, av_block_flag, interpretation_raw

2.2. Automatic event classification

- Rules derived from quantitative parameters were established for clinical classification:

Heart rate (HR):

  - *Bradycardia:* HR < 60 bpm
  - *Normal:* 60 ≤ HR ≤ 100 bpm
  - *Tachycardia:* HR > 100 bpm

Electric axis QRS:

  - *Left deviation:* QRS < −30°
  - *Normal:* −30° ≤ QRS ≤ +90°
  - *Right deviation:* QRS > +90°

- First-degree atrioventricular block: PR > 200 ms.
- Extrasystoles:
  - *Supraventricular (SVE)* si SVE > 0.
  - *Ventricular (VE)* si VE > 0.

These rules were integrated directly into the parse_ecg_text() function and applied to all processed records.

2.3. Descriptive analysis and visualization

The structured data were analyzed with descriptive statistics, generating:

- Patient distributions by sex and age groups (0–17, 18–29, 30–44, 45–59 and 60+ years).
- Bar charts of electrocardiographic events (plot_eventos()),
- Heatmaps of events by age (heatmap_eventos_edad()) and co-occurrences (heatmap_coocurrencia()),
- Histograms and boxplots of parameters (QTc, PR),
- Polar and radial graphs of the QRS axis (rose_plot_qrs()) and of parameters per patient (radar_paciente()),

Scatter plots between physiological variables (e.g., HR vs age).

The visualization allowed the identification of demographic trends and clinical patterns associated with age and sex.

2.4. Automatic export and summary

The graphical interface allows:

- Export results in CSV and XLSX formats, along with basic and advanced charts in PNG
- Generate an automatic summary with patient count, QRS axis classification, presence of brady/tachycardia, extrasystoles and atrioventricular blocks.

Variables analyzed

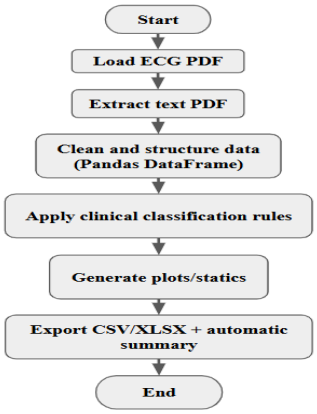
- Primary variables: presence of electrocardiographic events (tachycardia, bradycardia, axis deviations, ventricular or supraventricular extrasystoles, first-degree AV block).
- Secondary variables: PR, QRS, QT and QTc values, age and sex distribution, and co-occurrences between events.

Statistical analysis

The analysis consisted of calculating absolute and relative frequencies, graphing trends, and exploratory analysis of simple correlations (e.g., HR vs. age). Interpretations are based on previous literature on cardiovascular physiology and the epidemiology of cardiac events.

2.5 Algorithm flow diagram

The following flowchart summarizes the logic implemented in the proposed system for automated data extraction and classification of ECG reports (Figure 1).



3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Characteristics of the population studied by sex and age

The ECGs of 19 patients in the municipality of San Cristóbal de las Casas, Chiapas, Mexico, were analyzed (Figure 2). The algorithms enabled an initial classification of data by sex and age, which is important because these demographic variables will later allow for the implementation of models for the early identification of cardiovascular warnings.

The algorithms used for data extraction from medical records indicated that of the total study population, 16 were men (84.2%) and 3 were women (15.78%) (Figure 2A). The data showed a higher percentage of men who resorted to ECG studies; this trend may be due to biological factors, access to medical care, and sociocultural factors (Garcia Jose et al., 2017).

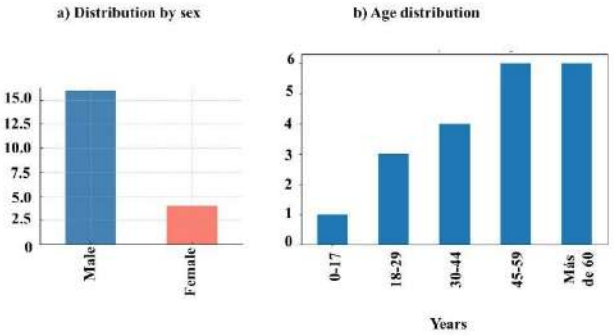


Figure 2. Study population. A) Distribution by sex. B) Distribution by age

According to official reports, in 2020 the municipality of San Cristóbal de las Casas had a population of 215,874 inhabitants, 47.4% of whom were men and 52.6% women. It is characterized by its abundant presence of indigenous groups descended from the Mayan culture, with agriculture, crafts, informal commerce, and tourism being its main economic activities (INEGI, 2020). These socioeconomic and cultural factors could influence the number of men and women who undergo ECG studies, since it has been shown that, in indigenous communities, women have less access to health services, which indicates that the male population erroneously represents the prevalence of cardiovascular diseases. Furthermore, cardiac complications tend to occur 10 to 15 years earlier in men than in women. (Collazo Herrera et al., 2002).

The age of the participants was higher in the 45 to 59 and 60 and older age groups (Figure 3B). These results indicate that, with increasing age, the percentage of people seeking medical check-ups for a possible cardiovascular event increase. This trend can be explained from a physiological perspective because the hormonal changes experienced over the years, changes in the development, structure, and electrical conduction system of the heart, and accumulated lifestyle habits can significantly influence the likelihood of a cardiovascular event with increasing age (Ahmadi et al., 2023).

During the first years of life, cardiovascular risk is associated with the decrease in heart rate due to the intrauterine environment, the ligation of the umbilical cord and the onset of early breathing (Sanches et al., 2014). While in later years it is due to physical inactivity, overweight, obesity, hyperglycemia, hypercholesterolemia, diet, alcohol and tobacco consumption. (Castro Bolívar, 2020).

3.2 Analysis of the frequency of events occurring in the population studied.

The events analyzed in the study population were tachycardia, bradycardia, right axis deviation, left axis deviation, first-degree atrioventricular block (AVB I), ventricular ectopics (VE), and supraventricular ectopics (SVE). Figure 3A shows the events that occurred in the population by age range. In the 0-17 age group, no tachycardia, right axis deviation, or ventricular ectopics were detected. However, 50% of supraventricular ectopics, first-degree atrioventricular block, left axis deviation, and bradycardia were detected.

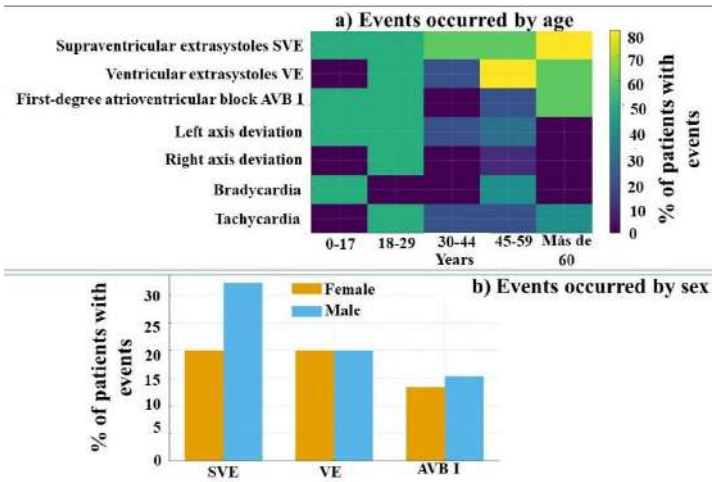


Figure 3. Number of events occurring in the study population. A) By age. B) By sex

In the population aged 18 to 29 years, no bradycardias were identified, but 50% of people presented tachycardias, right axis deviation, left axis deviation, first-degree atrioventricular block (AVB I), ventricular extrasystoles (VE) and supraventricular extrasystoles (SVE).

In the age range of 30 to 44 years, no bradycardia, right axis deviation, or first-degree atrioventricular block (AVB I) were detected, but 20% of the population were identified with tachycardia, left axis deviation, and ventricular extrasystoles (VE), in addition to 60% with supraventricular extrasystoles.

In the 45- to 59-year-old population, 30% of the population presented with tachycardia, bradycardia, right axis deviation, left axis deviation, and first-degree atrioventricular block. Supraventricular ectopic were also identified in 70% of the population and 80% in ventricular ectopic.

For the population aged 60 years and older, bradycardia, right axis deviation, and left axis deviation were not identified. However, 70% were identified with first-degree atrioventricular block and ventricular ectopic, as well as 80% with supraventricular ectopic

According to the data analysis, right axis deviation was only identified in patients aged 18 to 29 years, while bradycardia occurred in 50% of patients aged 0 to 17 years and in 30% of the population aged 45 to 59 years. In contrast, the events that were most prevalent in the entire population regardless of age were ventricular extrasystoles and supraventricular extrasystoles.

In the case of ventricular ectopic, these were identified in 50% of the population aged 18 to 29, decreasing by 20% in patients aged 30 to 44, but increasing significantly in the age ranges of 45 to 59 years and 60 years or older.

Meanwhile, supraventricular extrasystoles occurred in 50% of the population aged 0 to 29 years, increasing to 60% in people aged 30 to 44 years, 70% in those aged 45 to 59 years, and 80% in patients aged 60 years or older.

Specifically, left-axis deviation was identified in only 50% of people aged 0 to 29 years, as well as in 20% of those aged 30 to 44 years. Event-based analysis identified that tachycardia occurred in 50% of the population aged 18 to 29 years, gradually decreasing in adults aged 60 years or older and 30 to 59 years and was absent in those aged 0 to 17 years. Bradycardia occurred in 50% of young people aged 0 to 17 years, decreasing in adults aged 45 to 59 years, and was absent in the other age ranges.

Left axis deviation was absent in adults aged 60 years or older, but was present in 50% of young adults aged 0 to 17 years, decreasing significantly for the age ranges of 18 to 29 years, 45 to 59 years, and 30 to 44 years. In contrast, right axis deviation was not present in individuals aged 18 to 29 years, but was present in 50% of young adults aged 0 to 17 years, gradually decreasing in individuals aged 30 to 44 years, 60 years or older, and 45 to 59 years. Meanwhile, the most prevalent events were ventricular extrasystoles (80%) in individuals aged 45 to 59 years, supraventricular extrasystoles (80%) for adults aged 60 years or older, and first-degree atrioventricular block (65%) in the population aged 60 years or older. A higher percentage of men experienced supraventricular ectopics and first-degree atrioventricular block compared to women. The percentage of men and women with ventricular ectopics was the same (Figure 3B).

The pattern of occurrence of events by age groups and their prevalence may be associated with genetic predisposition, cardiovascular physiology, age, sex, comorbidities and physical factors such as ambient temperature (Ashraf et al., 2023; Stewart, 2024).

Scientific evidence shows that there is a greater likelihood of experiencing cardiovascular events with increasing age (Ke et al., 2023). It is known that, in the first years of life, the heart rate is higher because the heart is still small and for adequate circulation it must pump faster, which allows it to meet the high metabolic demands of children and adolescents. During adolescence and early adulthood, a balance is reached between energy expenditure and cardiac muscle strength. However, with increasing age, circulatory efficiency decreases, resulting in lower arterial compliance, greater sympathetic nervous system activity, and weaker parasympathetic control. Other significant changes include arterial stiffness, left ventricular enlargement, and decreased baroreceptor sensitivity. Consequently, the risk of one or more cardiovascular events such as tachycardia, bradycardia, right axis deviation, left axis deviation, first-degree atrioventricular block, ventricular ectopics, and supraventricular ectopics increases (Mishra y Kumari, 2025).

In addition, comorbidities also play an important role in cardiovascular health. It has been shown that men and women with diabetes may experience acute myocardial infarction and stroke 14.6 years earlier compared to the healthy population. These events generally occur between the ages of 47.9 and 54.3 years (Booth et al., 2006).

Additionally, it has been suggested that fluctuations in environmental physicochemical parameters influence the occurrence of cardiovascular events. These events appear to increase in cold climates (Stewart, 2024).

3.2.1 Analysis of co-occurrence of events by patients

Figure 4 shows the co-occurrence of electrocardiographic events in the study population sample. These results indicated that a high percentage of patients may present with supraventricular and ventricular ectopics, tachycardias with ventricular ectopics, left axis deviation with supraventricular ectopics, left axis deviation with ectopics, first-degree atrioventricular block with supraventricular ectopics, first-degree atrioventricular block with ectopics, bradycardias with supraventricular ectopics, and right axis deviation with first-degree atrioventricular block.

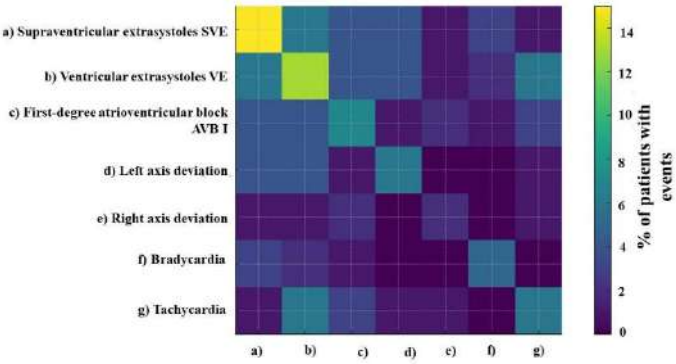


Figure 4. Co-occurrence of events by patients

In contrast, the combinations of events not observed included right axis deviation with left axis deviation, tachycardia with supraventricular ectopics, bradycardia accompanied by tachycardia, and right and left axis deviation. Cardiovascular problems that people may experience simultaneously are of interest, as they can pose a health risk. The main factors that can influence cardiovascular events are stress, anxiety, and depression, which are part of daily life (Dwivedi and Mohammad, 2024). However, identifying risk factors early

and monitoring the progress of patients' medical histories is a clinical challenge. For this reason, one of the strategies used is the development of automated systems for the correct detection of cardiovascular events. Their use contributes to the early identification of critical conditions, reducing interpretation errors, and standardizing diagnostic criteria (Li et al., 2024).

3.3 Statistical and functional validation

A descriptive statistical validation was performed to verify the coherence of the extracted data and the functional performance of the implemented algorithm. The analysis included the calculation of absolute and relative frequencies of electrocardiographic events (tachycardia, bradycardia, axis deviations, extrasystoles, and first-degree atrioventricular block), as well as the generation of histograms and scatter plots to identify patterns related to age and sex.

Relative frequencies were calculated from the number of occurrences (f_i) of each event with respect to the total number of analyzed records (N) according to the following equation:

$$f_{ri}=fi / N \times 100$$

where:

- f_{ri} = relative frequency of event i (%),
- f_i = absolute frequency of event i,
- N = total number of analyzed ECG reports ($N=19$).

Table 1 summarizes the results obtained. The most frequent events were supraventricular extrasystoles (63.2%) and ventricular extrasystoles (52.6%), followed by left axis deviation (36.8%) and tachycardia (31.6%). These findings demonstrate the algorithm's ability to automatically identify relevant electrocardiographic alterations consistent with clinical literature. In addition, a manual cross-check of randomly selected reports confirmed an agreement above 95% between automatic extraction and manual reading, validating the accuracy and reproducibility of the proposed system.

Table 1. Absolute and relative frequencies of detected electrocardiographic events

Electrocardiographic event	Absolute frequency (f)	Relative frequency (%)
Tachycardia	6	31.6 %
Bradycardia	3	15.8 %
Left axis deviation	7	36.8 %
Right axis deviation	2	10.5 %
Ventricular extrasystoles (VE)	10	52.6 %
Supraventricular extrasystoles (SVE)	12	63.2 %
First-degree AV block	5	26.3 %

4. CONCLUSIONS

The algorithm used to extract data from the electrocardiograms of 19 patients in the municipality of San Cristóbal de las Casas, Chiapas, enabled the clinical classification of the events present in everyone. This represents a significant advance in supporting cardiology diagnosis. This system allowed for the automation of biomedical signal analysis, reducing human error, and improving the efficiency of the diagnostic process.

This is the first study to implement the use of bioinformatics tools in the early identification of cardiovascular warnings in a southeastern state of Mexico. However, there is a need for more data to validate the rigor of the algorithms used.

REFERENCES

Ahmadi, P., Afzalian, A., Jalali, A., Sadeghian, S., Masoudkabir, F., Oraii, A., Ayati, A., Nayebirad, S., Pezeshki, P. S., Lotfi Tokaldani, M., Shafiee, A., Mohammadi, M., Sanei, E., Tajdini, M., y Hosseini, K. (2023). Age and gender differences of basic electrocardiographic values and abnormalities in the general adult population; Tehran Cohort Study. *BMC Cardiovascular Disorders*, *23*(1), 1–13. https://doi.org/10.1186/s12872-023-03339-z

Almuhanna, M. A., Alanazi, M. H., Nasser, R., Ghamdi, A., Alwayli, N. S., Alghamdi, I. S. G., Qari, A. A., Alzahid, A., Alharbi, F. F., Mohammed, N., Alwagdani, A., Alharthi, A., Medicine, E., Hospital, D., Medicine, F., Medicine, F., Abdulaziz, K., y Hospital, S. (2021.). *Tachycardia Evaluation and its Management Approach , Literature Review*. *11*(1), 4–8.

Ashraf, M., Sulaiman, S., Alyami, B., Bhatia, A., y Jahangir, A. (2023). Seasonal Variation in the Incidence of In-Hospital Cardiac Arrest. *JACC: Clinical Electrophysiology*, *9*(8P3), 1755–1767. https://doi.org/10.1016/j.jacep.2023.04.012

Attena, E., Albani, S., Maraolo, A. E., Mollica, M., De Rosa, A., Pisapia, R., Fiorentino, G., Parrella, R., Severino, S., y Russo, V. (2021). Remdesivir-Induced Bradycardia in COVID-19: A Single Center Prospective Study. *Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology*, *14*(7), E009811. https://doi.org/10.1161/CIRCEP.121.009811

Bacharova, L. (2022). ECG in left ventricular hypertrophy: A change in paradigm from assessing left ventricular mass to its electrophysiological properties. *Journal of Electrocardiology*, *73*(May), 153–156. https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2022.06.002

Battaglia, S., Nazzi, C., Lonsdorf, T. B., y Thayer, J. F. (2024). Neuropsychobiology of fear-induced bradycardia in humans: progress and pitfalls. *Molecular Psychiatry*, *29*(12), 3826–3840. https://doi.org/10.1038/s41380-024-02600-x

Benjamin, E. J., Virani, S. S., Callaway, C. W., Chamberlain, A. M., Chang, A. R., Cheng, S., Chiuve, S. E., Cushman,

M., Delling, F. N., Deo, R., De Ferranti, S. D., Ferguson, J. F., Fornage, M., Gillespie, C., Isasi, C. R., Jiménez, M. C., Jordan, L. C., Judd, S. E., Lackland, D., Muntner, P. (2018). Heart disease and stroke statistics - 2018 update: A report from the American Heart Association. In *Circulation* (Vol. 137, Issue 12). https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000558

Booth, G. L., Kapral, M. K., Fung, K., y Tu, J. V. (2006). Relation between age and cardiovascular disease in men and women with diabetes compared with non-diabetic people: a population-based retrospective cohort study. *Lancet*, *368*(9529), 29–36. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(06)68967-8

Calò, L., Crescenzi, C., Martino, A., Casella, M., Romeo, F., Cappelletto, C., Bressi, E., Panattoni, G., Stolfo, D., Targetti, M., Toso, E., Musumeci, M. B., Tini, G., Ciabatti, M., Stefanini, M., Silvetti, E., Stazi, A., Danza, M. L., Rebecchi, M., Gaita, F. (2023). The Diagnostic Value of the 12-Lead ECG in Arrhythmogenic Left Ventricular Cardiomyopathy: Novel ECG Signs. *JACC: Clinical Electrophysiology*, *9*(12), 2615–2627. https://doi.org/10.1016/j.jacep.2023.08.020

Castro Bolívar, J. C. V. O. (2020). Factores de riesgo cardiovasculares y su prevalencia en pacientes de 18 a 66 años hospitalizados en una clínica de tercer nivel de Barranquilla. *Ofil Ilaphar*, *32*(35), 129–136.

Collazo Herrera, M., Cárdenas Rodríguez, J., González López, R., Abreu, R. M., Gálvez González, A. M., y Casulo, J. C. (2002). La economía del la salud: ¿debe ser de interés para el campo sanitario? *Revista Panamericana de Salud Pública*, *12*(5), 359–365. https://doi.org/10.1590/s1020-49892002001100014

Costa, C. A. H. D. da, Coelho, G. M. M., Villar, R. T. H. O. S. G., Oliveira, G. R. de, Filgueiras, P. H. C., Coutinho, E. L., Cirenza, C., y de Paola, A. A. V. (2025). The Impact of the Spatial Distribution of Ventricular Extrasystoles on Implantable Cardioverter-Defibrillator Recipients. *PACE - Pacing and Clinical Electrophysiology*, 1–10. https://doi.org/10.1111/pace.70033

Della Bella, P., Baratto, F., Vergara, P., Bertocchi, P., Santamaria, M., Notarstefano, P., Calò, L., Orsida, D., Tomasi, L., Piacenti, M., Sangiorgio, S., Pentimalli, F., Pruvot, E., De Sousa, J., Sacher, F., Tritto, M., Rebellato, L., Deneke, T., Romano, S. A., Radinovic, A. (2022). Does Timing of Ventricular Tachycardia Ablation Affect Prognosis in Patients With an Implantable Cardioverter Defibrillator? Results From the Multicenter Randomized PARTITA Trial. *Circulation*, *145*(25), 1829–1838. https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.122.059598

Diaconu, O., Wyss, C., y Ghenzi, R. (2025). Extrasystolie – ein weitverbreitetes Phänomen. *Praxis*, *114*(5), 181–187. https://doi.org/10.23785/PRAXIS.2025.05.005

Dwivedi, S., & Mohammad, A. (2024). Heartbeat Pattern and Arrhythmia Classification: A Review. *Frontiers in Biomedical Technologies*, *11*(1), 130–148. https://doi.org/10.18502/fbt.v11i1.14520

Fox, C. S., Coady, S., Sorlie, P. D., Levy, D., Meigs, J. B., Agostino, R. B. D., Wilson, P. W. F., & Savage, P. J. (2016). *of Diabetes*. *292*(20), 2495–2499.

Garcia Jose, García Anaí, Priego Oscar, & Martinez Lenin. (2017). Salud desde una perspectiva económica. Importancia de la salud para el crecimiento económico, bienestar social y desarrollo humano. *Salud En Tabasco*, *23*(1). http://salud.tabasco.gob.mx/content/revista

Ke, C., Lipscombe, L. L., Weisman, A., Zhou, L., Austin, P. C., Shah, B. R., y Booth, G. L. (2023). Change in the Relation Between Age and Cardiovascular Events Among Men and Women With Diabetes Compared With Those Without Diabetes in 1994–1999 and 2014–2019: A Population-Based Cohort Study. *Diabetes Care*, *46*(10), 200–202. https://doi.org/10.2337/DC23-0952

Kunigeliene, R., Kinciniene, O., Usonis, V., y Lesinskiene, S. (2024). The Relationship between Depression Symptoms and Physical Activity in Children with Idiopathic Ventricular Extrasystoles. *Medicina (Lithuania)*, *60*(2). https://doi.org/10.3390/medicina60020213

Li, Q., Liu, Y., Zhang, Z., Liu, J., Yuan, Y., Wang, K., & He, R. (2024). Learning with incomplete labels of multisource datasets for ECG classification. *Pattern Recognition*, *150*(October 2022), 110321. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2024.110321

Liu, M., Du, Z., y Sun, Y. (2022). Prognostic significance of first-degree atrioventricular block in a large Asian population: a prospective cohort study. *BMJ Open*, *12*(4), 1–8. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-062005

Lönnrot, A., Inkovaara, J., Arola, O., Penttilä, T., Mäkynen, H., Aalto-Setälä, K., & Yli-Mäyry, S. (2023). Therapy Efficacy of Idiopathic Ventricular Extrasystoles: A Real Life Study. *Journal of Interventional Cardiology*, *2023*. https://doi.org/10.1155/2023/5590422

Lui, J. K., Sangani, R. A., Chen, C. A., Bujor, A. M., Trojanowski, M. A., Gopal, D. M., LaValley, M. P., Soylemez Wiener, R., y Klings, E. S. (2022). Prognostic Value of Cardiac Axis Deviation in Systemic Sclerosis–Related Pulmonary Hypertension. *Arthritis Care and Research*, *74*(7), 1219–1226. https://doi.org/10.1002/acr.24724

Mishra, K. K., y Kumari, N. (2025). *Variations in Resting Heart Rate across Different Age Groups : A Cross-Sectional Study*. *17*(3), 1683–1687.

Mitra, S., y Mitra, M. (2003). An automated data extraction system from 12 lead ECG images. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, *71*(1), 33–38. https://doi.org/10.1016/S0169-2607(02)00032-9

Ponnusamy, S. S., y Vijayaraman, P. (2022). Axis deviation in nonischemic cardiomyopathy with left bundle branch block: Insights from left bundle branch pacing. *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, *33*(2), 318–321. https://doi.org/10.1111/jce.15334

Rundo, F., Conoci, S., Ortis, A., y Battiato, S. (2018). An advanced bio-inspired photoplethysmography (PPG) and ECG pattern recognition system for medical assessment. *Sensors (Switzerland)*, *18*(2). https://doi.org/10.3390/s18020405

Sanches, M., Coelho, A., Oliveira, E., y Lopes, A. (2014). Electrocardiograma en edad pediátrica. *SEMERGEN - Medicina de Familia*, *40*(6), 334–340. https://doi.org/10.1016/j.semerg.2013.10.007

Seko, Y., Kato, T., Yamaji, Y., Haruna, Y., Nakane, E., Haruna, T., y Inoko, M. (2021). Clinical impact of left and right axis deviations with narrow QRS complex on 3-year outcomes in a hospital-based population in Japan. *Scientific Reports*, *11*(1), 1–7. https://doi.org/10.1038/s41598-021-88259-8

Singh, A. K., y Krishnan, S. (2023). ECG signal feature extraction trends in methods and applications. In *BioMedical Engineering Online* (Vol. 22, Issue 1). BioMed Central. https://doi.org/10.1186/s12938-023-01075-1

Stewart, S. (2024). *Climate-Driven Variations in Cardiovascular Events*. *Dong 2007*, 73–95. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73106-8_5

Surawicz, B., Childers, R., Deal, B. J., y Gettes, L. S. (2009). AHA/ACCF/HRS recommendations for the standardization and interpretation of the electrocardiogram: Part III: Intraventricular conduction disturbances: A scientific statement from the American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee,. *Circulation*, *119*(10). https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.108.191095

Tanaka, Y., Tada, H., Hamaya, R., Patel, R. B., Hayashi, K., Yamagami, K., Hashiba, A., Takamura, M., Kawashiri, M. aki, y Greenland, P. (2021). First-degree atrioventricular block is significantly associated with incident atrial fibrillation in the population predominantly including participants aged ≥ 60 years. *Heart and Vessels*, *36*(9), 1401–1409. https://doi.org/10.1007/s00380-021-01805-2

Tang, C., Yu, H., Shao, S., Hua, Y., Chen, M., Zhu, Q., Li, Y., Zhou, K., y Wang, C. (2021). Case Report: Prenatal Diagnosis and Treatment of Fetal Autoimmune-Associated First-Degree Atrioventricular Block: First Report From China. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, *8*(June), 1–8. https://doi.org/10.3389/fcvm.2021.683486

Timmers, L., Vervaet, P., Goethals, P., De Pooter, J., Vanheuverswyn, F., Van de Velde, E., De Pauw, M., y Jordaens, L. (2022). Quality of life and symptoms in patients selected for ablation of ventricular extrasystoles: a prospective study. *Journal of Interventional Cardiac Electrophysiology*, *65*(3), 601–607. https://doi.org/10.1007/s10840-021-01092-x

Touafchia, A., Bagheri, H., Carrié, D., Durrieu, G., Sommet, A., Chouchana, L., y Montastruc, F. (2021). Serious bradycardia and remdesivir for coronavirus 2019 (COVID-19): a new safety concerns. *Clinical Microbiology and Infection*, *27*(5), 791.e5-791.e8. https://doi.org/10.1016/j.cmi.2021.02.013

Uusitalo, A., Tikkakoski, A., Reinikainen, M., Lehtinen, P., Ylänen, K., Korhonen, P., y Poutanen, T. (2022). Extrasystoles or short bradycardias of the newborn seldom require subsequent 24-hour electrocardiographic monitoring. *Acta Paediatrica, International Journal of Paediatrics*, *111*(5), 979–984. https://doi.org/10.1111/apa.16259

Van der Ree, M. H., Vendrik, J., Kors, J. A., Amin, A. S., Wilde, A. A. M., Tan, H. L., y Postema, P. G. (2021). Left axis deviation in brugada syndrome: Vectorcardiographic evaluation during ajmaline provocation testing reveals additional depolarization abnormalities. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(2), 1–9. https://doi.org/10.3390/ijms22020484

Vernino, S., Bourne, K. M., Stiles, L. E., Grubb, B. P., Fedorowski, A., Stewart, J. M., Arnold, A. C., Pace, L. A., Axelsson, J., Boris, J. R., Moak, J. P., Goodman, B. P., Chémali, K. R., Chung, T. H., Goldstein, D. S., Diedrich, A., Miglis, M. G., Cortez, M. M., Miller, A. J., Raj, S. R. (2021). Postural orthostatic tachycardia syndrome (POTS): State of the science and clinical care from a 2019 National Institutes of Health Expert Consensus Meeting - Part 1. *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, *235*. https://doi.org/10.1016/j.autneu.2021.102828

Wang, L. H., Xie, C. X., Yang, T., Tan, H. X., Fan, M. H., Kuo, I. C., Lee, Z. J., Chen, T. Y., Huang, P. C., Chen, S. L., y Abu, P. A. R. (2024). Paper-Recorded ECG Digitization Method with Automatic Reference Voltage Selection for Telemonitoring and Diagnosis. *Diagnostics*, *14*(17). https://doi.org/10.3390/diagnostics14171910

Wu, H., Patel, K. H. K., Li, X., Zhang, B., Galazis, C., Bajaj, N., Sau, A., Shi, X., Sun, L., Tao, Y., Al-Qaysi, H., Tarusan, L., Yasmin, N., Grewal, N., Kapoor, G., Waks, J. W., Kramer, D. B., Peters, N. S., & Ng, F. S. (2022). A fully-automated paper ECG digitisation algorithm using deep learning. *Scientific Reports*, *12*(1), 1–12. https://doi.org/10.1038/s41598-022-25284-1

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Identification and control of a binary distillation column for an azeotropic mixture

Moisés Lobatón-Montiel*, Elsa Hynmar Fernández-Martínez*, Brian Manuel González-Contreras*

**Facultad de Ciencias Básicas Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Apizaco, Tlaxcala (Tel: 241-222-4129; e-mail: 20208259@uatx.mx)*

Abstract: The dynamic control of distillation columns, especially of azeotropic and high purity systems, is particularly complex due to the presence of nonlinearity, directionality, interactions between variables and conditioning problems, being these factors the ones that limit the performance of the control structures. In this work, the identification and construction of a model of an azeotropic binary distillation column is developed by simulation, perturbing the feed flow, reflux ratio and thermal load in the reboiler, then a model predictive control is implemented using MATLAB code. Two configurations of the column were considered, discarding one of them for not fitting an adequate identification model and the model predictive control was applied to the identified configuration to verify its performance and dynamic behavior against perturbations in the feed flow rate. It was verified that the proposed controller adequately regulates the operation of the process.

Keywords: Distillation column, azeotropic, conventional control, model predictive control, energy consumption, dynamic models

1. INTRODUCTION

Las columnas de destilación convencionales binarias son equipos unitarios empleados en la industria química y petroquímica, caracterizados por una corriente de entrada y dos corrientes de salida, denominados productos. En las columnas se llevan a cabo el proceso de separación y purificación de dos componentes en una mezcla. El caso de estudio en este trabajo es la mezcla etanol y agua. El objetivo de separación en la destilación se basa en la diferencia de los puntos de ebullición de los componentes, donde el componente más volátil se enriquece en el domo de la columna, mientras que el componente más pesado se purifica en los fondos. La separación se lleva a cabo mediante múltiples etapas de equilibrio de vaporizaciones y condensaciones a través de la columna, con transferencia de energía y de masa entre las fases líquida y vapor (Treybal, 1980). La mezcla etanol/agua forma un azeótropo de temperatura de ebullición mínima con una composición azeotrópica del 95.6% en peso de etanol y una temperatura azeotrópica de 78.2°C (Tututi-Ávila et al., 2014). Desde el punto de vista químico, la similitud entre los grupos de hidroxilos (-OH) del etanol y del agua favorecen enlaces por puente de hidrógeno, el grupo metilo (-CH3) del etanol introduce una región apolar en la que altera la red de interacciones del agua, siendo esta diferencia estructural en la que se genera desviaciones negativas del comportamiento ideal, lo que da lugar al comportamiento azeotrópico observado en el sistema (Luyben & Chien, 2006).

El interés de estudio de este sistema azeotrópico consiste en el análisis tanto energético como de control de la columna pre-concentradora, la cual forma parte del proceso de deshidratación de bioetanol. Uno de los problemas que presentan los procesos biotecnológicos se enfoca en la separación de los productos de la fermentación, debido a que contiene una gran cantidad de agua, lo que se traduce en altos consumos de energía de separación. A esta columna pre-concentradora se alimenta una corriente con una composición entre el 5% y el 12% de etanol y debe purificarse antes la composición azeotrópica, varios estudios de deshidratación de etanol reportan composiciones entre 84% y 88% molar de etanol (Gil et al., 2012), aunque una composición muy cercana a la composición azeotrópica demanda energía de separación exponencial y fallas en el control de la columna pre-concentradora. Kiss & Ignat (2013) reportaron consumos energéticos tres veces mayores de la columna pre-concentradora con respecto al proceso de deshidratación.

El alto consumo de energía de las columnas de destilación pre-concentradoras es uno de los inconvenientes que se presentan, pero también es relevante el rendimiento del sistema de control, sobre todo en columnas con sistemas azeotrópicos, donde se muestran comportamientos no lineales (Kiss & Ignat, 2013). Uddin et al., (2018) señalan que las columnas de alta pureza exhiben comportamientos en donde la no linealidad, la direccionalidad, las interacciones debidas a los acoplamientos entre variables y el mal condicionamiento pueden llegar a perjudicar el rendimiento del sistema de control de la columna cuando se utiliza una estructura de control convencional.

Por lo cual, existe la necesidad de implementar sistemas de control avanzados que permitan un modelo en el cual se predigan las salidas e insumos futuros en la planta (Anwari, 2006). En el caso particular de las columnas de destilación, las variables más importantes son las purezas de los productos, en las que se aplicaría este control. Como se describe en Biegler (2021) un Control Predictivo basado en Modelo (*MPC*, por sus siglas en inglés) es un tipo de control avanzado que se basa en modelos matemáticos para predecir el comportamiento futuro del sistema, en el que se incorporan restricciones explícitas en

la formulación del problema de control, situación que no es posible llevar a cabo en estructuras de control convencionales como los controladores Proporcional-Integral (PI) comúnmente empleados en los procesos. Ante la creciente complejidad de los procesos industriales, se han desarrollado estrategias de control para hacer frente a las interacciones multivariables, restricciones operativas y las exigencias de eficiencia energética, utilizando enfoques adaptivos y robustos. Desborough & Miller (2002) mencionan que el desarrollo del MPC ha sido impulsado por avances en la capacidad computacional, disponibilidad de modelos precisos e incluso se mejora el rendimiento económico en las operaciones. La implementación del MPC requiere de decisiones de diseño cuidadosas, desde la selección de las variables manipuladas, controladas y las de perturbación, así como las de validación del controlador bajo distintos escenarios operativos, asimismo es importante que la sintonización de estos controladores sea adecuada al proceso por controlar, ya que de esto depende el buen funcionamiento del proceso, igualmente asumir una calidad adecuada de las mediciones disponibles es un criterio importante (Darby, 2014).

En este trabajo se hace la identificación de un modelo obtenido a partir de la simulación dinámica de una columna de destilación convencional binaria de un sistema azeotrópico. Sobre la base del control de inventario para la columna de destilación, se diseñó el MPC. En el siguiente apartado se describe proceso de simulación de la columna de destilación azeotrópica binaria y el diseño de la columna para el sistema etanol/agua. Posteriormente se describe el método que se utilizó para realizar la identificación del modelo y obtener las funciones de transferencia con las que se implementó el control MPC mediante un código en el software MATLAB, utilizando el criterio del ITAE (Integral del Valor Absoluto Multiplicado por el Tiempo) como métrica para evaluar el rendimiento del esquema MPC.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La mezcla Etanol/Agua es de interés en la industria química debido a su posterior purificación como combustible mediante destilación asistida. La separación de Etanol en una columna convencional binaria muestra un consumo considerable de energía y, al mismo tiempo, se presentan problemas en el control de esta. Esto es provocado por la presencia del azeótropo que hace que el sistema sea no lineal. Un sistema de control convencional, como el Proporcional-Integral, es inadecuado para controlar las variables cuando la mezcla se encuentra en la cercanía de la composición azeotrópica, por lo que se requiere de una alternativa de control como el MPC.

Para la simulación de la columna de destilación binaria convencional se utilizó el simulador de procesos *UniSim Design* versión R500 de Honeywell, la composición del producto de destilado es inferior a la composición azeotrópica. El diseño de la columna en este estudio se tomó del trabajo de Uddin et al. (2018). En ese trabajo de investigación se consideró la pureza de 82% mol, que ofrece un mejor rendimiento operativo y de desempeño.

2.1. Diseño de la columna.

El diseño de la columna de destilación tiene 17 etapas (incluyendo el condensador y el rehervidor) la etapa de alimentación es la número 9, y está conectada con la válvula VLV-101 y en dirección a la torre T-100, la cual tiene una altura de 5.5 metros, un diámetro de 0.15 metros y espaciado entre las etapas de 0.35 metros. Las especificaciones de alimentación para la columna se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de alimentación y servicios

Variable	Valor
Temperatura [°C]	77
Presión [kPa]	130.95
Fujo [kmol/h]	21.42
Fracción molar C_2H_6O	0.25
Fracción molar H_2O	0.75
Flujo de destilado [kmol/h]	2.64
Presión en el domo [kPa]	128.4
Presión en el hervidor [kPa]	135.78
Consumo energético total [kW]	218.1

El modelo termodinámico utilizado que estima las propiedades en el Equilibrio Líquido-Vapor (ELV) de la mezcla es el modelo de UNIQUAC (*UNIversal QUasi-chemical Activity Coefficients)* utilizado para la predicción del equilibrio de mezclas azeotrópicas (Abrams y Prausnitz, 1975), la ecuación que describe el modelo se presenta en la ecuación (1):

$$\gamma_i = \ln \gamma_i^C + \ln \gamma_i^R \quad (1)$$

Los parámetros de interacción entre los componentes de la mezcla etanol/agua se muestran en la Tabla 2 tomados de Gmeling et al., (1990). Los valores del área molecular (r) y del volumen molecular (q) son 2.105 y 1.9772 para el etano, y 0.92 y 1.4 para el agua, respectivamente.

Tabla 2. parámetros de interacción molecular para mezcla etanol/agua

Parámetros de interacción	Valor
A_{12}	21.7366
A_{21}	262.9622

En la Figura 1. se muestran los perfiles de composición del etanol y el agua a lo largo de las etapas en la columna, siendo la etapa 0 la que corresponde al condensador ubicado en el parte superior de la columna. El producto que se condensa y se retira en la corriente de destilado es rico en etanol (componente clave ligero), alcanzando una pureza del 82% mol.

A medida que se desciende de la columna, desde la etapa dos hasta la etapa ocho, la composición del etanol disminuye progresivamente, mientras que la composición del agua se incrementa en los fondos de la columna (componente clave pesado). La etapa de alimentación divide a la columna de

destilación en 2 zonas, en la parte superior asciende la fase vapor, donde se enriquece el componente más volátil, denominándose esta la región como la de rectificación, mientras que el líquido que desciende se empobrece el etanol en la zona de agotamiento, al mismo tiempo que se enriquece el componente clave pesado. Los perfiles de composición líquida de ambos componentes se intersecan en la etapa nueve, lo que denota, que esta es la etapa de alimentación. La tendencia mostrada en la Figura 1 es clásica de la separación de una mezcla binaria. La etapa 17 es el rehervidor, donde se deposita el residuo líquido, siendo el agua predominante por ser el componente menos volátil. En esta zona, la fase líquida se calienta nuevamente hasta alcanzar temperaturas por arriba de 90 °C.

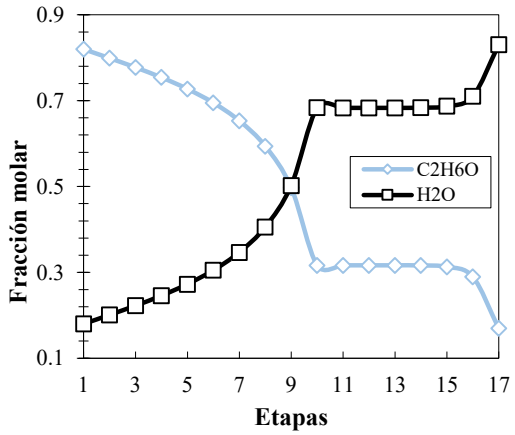


Figura 1. Perfiles de composición en la columna de destilación

Esta forma en los perfiles indica que la columna opera con buena eficiencia en las etapas, logrando una separación efectiva entre los componentes. La estabilización de las composiciones en las etapas inferiores sugiere que se ha alcanzado un equilibrio de composición típico en el rehervidor. El comportamiento dinámico de la columna de destilación binaria se analiza considerando un esquema de control convencional utilizando controladores PI, los cuales permiten mantener a la columna de destilación en condiciones operativas estables, considerando dos configuraciones de simulación, en la primera se diseñaron todos los equipos de manera individual, mientras que en el segundo todos los equipos están integrados en el mismo modelo. Cabe destacar que ambas configuraciones tienen las mismas especificaciones físicas y de diseño en el estado estacionario.

2.2. Primera configuración.

Para la primera configuración (C1) se utilizaron 6 controladores, considerando el diseño de cada uno los equipos que conforman el proceso de separación y la simulación se construyeron desde el estado dinámico. Esto incluye intercambiadores de calor de tubo y coraza (para condensador y rehervidor), bomba de condensados y tanques de condensados y del sumidero de la columna. El tanque de fondos se considera como la última etapa de la columna ya que de esta manera se puede lograr controlar el nivel de líquido en la columna, como se muestra en la Figura 2.

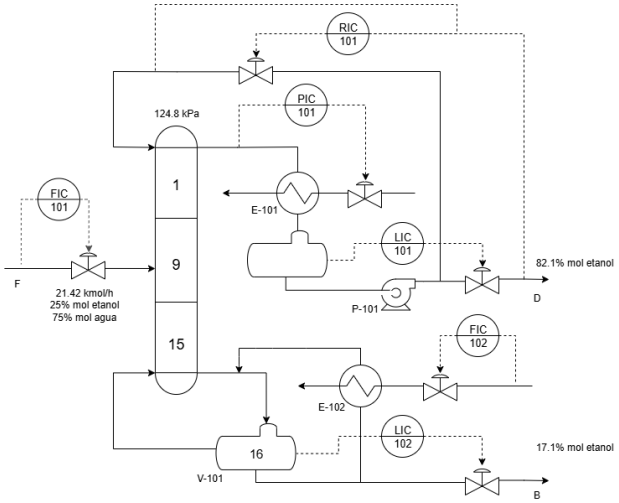


Figura 2. Esquema de simulación dinámica de la columna de destilación binaria convencional binaria azeotrópica (C1).

El primer control FIC-101, regula el flujo de alimentación hacia la columna mediante la válvula VLV-101 con un SP (*Set Point)* de 21,42 kmol/h, recibiendo señal de la corriente aguas debajo de la misma válvula. Esto permite que el flujo de alimentación sea constante, con la finalidad de garantizar la estabilidad de la columna.

El segundo lazo de control corresponde al controlador de presión en el domo de la columna, identificado como PIC-101 con un SP de 128.4 kPa. Este controlador actúa directamente en el flujo de agua de enfriamiento del condensador, ajustando la cantidad de calor removido para mantener la presión interna dentro de los límites establecidos, es importante resaltar la importancia de este controlador ya que de este depende la estabilidad de la columna, debido a que fluctuaciones afectan la eficiencia, operación y comportamiento dinámico de la separación.

El tercer y cuarto lazos de control mantienen el nivel de líquido, uno en el domo de la columna instalado en el tanque de condesados (LIC-101), y otro en el tanque de fondos de la columna, identificado como LIC-102. El nivel de ambos equipos es controlado mediante las válvulas VLV-103 y VLV-105 respectivamente que permiten la salida de flujo. Ambos controladores operan al 50% de su capacidad, lo que permite mantener una operación adecuada para evitar problemas de desbordamiento en el tanque de condensados o inundación en la columna, frente a diferentes perturbaciones, con la finalidad de mantener la estabilidad operacional y continuidad de la columna.

Adicional al esquema de control propuesto por Uddin et al., (2018), en este estudio se incorpora un control de reflujo RIC-101 que actúa sobre la válvula VLV-104, regulando el flujo del reflujo de la relación L/D (reflujo en el domo de la columna). Esta relación es calculada por el operador OS-1, el cual recibe señales directas del caudal de destilado y de la

corriente de reflujo, efectuando la división y envía el valor de la razón de reflujo al controlador. El flujo de ajusta mediante la VLV-104, que opera a un SP de 2.8 de relación de reflujo. También se incluyó un controlador de flujo de vapor (servicio auxiliar) en el rehervidor, este lazo de control recibe señal de medición aguas abajo de la VLV-108, la cual regula el caudal de entrada del vapor hacia el rehervidor.

2.3. Segunda configuración.

Para la segunda configuración de simulación (C2) se toma el modelo completo que incluye la columna, el condensador y el rehervidor en estado estable, para posteriormente pasarlo a estado dinámico. Para esta configuración solo se consideran cuatro lazos de control. El primer controlador FIC-101 es el control de flujo de alimentación de la columna; PIC-101, el control de presión en la columna, LIC-101 y LIC-102 son los lazos de control de nivel de líquido para el tanque del condensador en el domo de la columna y el tanque del rehervidor (sumidero de la columna). Considerando esta configuración una estructura simplificada para simular la columna binaria azeotrópica, tal como se muestra en la Figura 3.

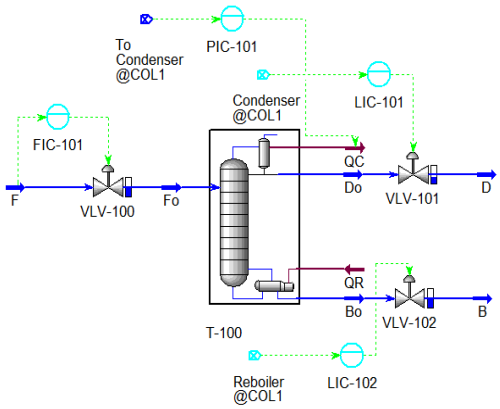


Figura 3. Segunda configuración de simulación dinámica de la columna de destilación binaria convencional en UniSim Design

Para la sintonización de estos 4 controladores se realizan mediante reglas heurísticas proporcionadas por Tyreus y Luyben (1992). Esta estructura de control de inventario proporciona una base para mantener en operación estable a la columna de destilación, y con ello implementar estrategias de control avanzadas, como, por ejemplo, el MPC. Garantizando que las variables críticas en el proceso de separación (flujo de alimentación, relación de reflujo y carga térmica en el rehervidor) se mantengan estables para controlar las composiciones de los productos.

3. IDENTIFICACIÓN DEL PROCESO

La identificación del modelo o funciones de transferencia son modelos matemáticos del proceso que son relacionales compuestas por polinomios en variable *"s"* como se muestra en la ecuación (2).

$$G_{ij} = \frac{K_{ij}}{\tau_{ij}s + 1} L_s \qquad (2)$$

donde K_{ij} es la ganancia estática del sistema, τ_{ij} es la constante de tiempo, es decir la velocidad en la que responde el sistema y Ls el retardo o el tiempo muerto. En general este tipo de ecuación representa un modelo FOPTD (*First Orden Plus Time Delay*). Este tipo de modelo es utilizado para aproximaciones lineales, análisis y diseño de controladores (Luyben, 1993; Pathiran, 2017). En la identificación del modelo se emplea como señal de excitación un cambio del tipo "escalón", que se traduce en aplicar una perturbación del 10% a cada una de las siguientes variables: flujo de alimentación, reflujo y carga térmica en el rehervidor de manera individual al minuto 90. El sistema se encontraba en estado estacionario cuando se aplicó el cambio y se esperó a que el sistema alcanzara nuevamente el estado estacionario.

Para este caso de estudio se genera una matriz de sistema MIMO (*Multiple-Input, Multiple-Output*) 2X3. Como entradas F, R y Q_B (flujo de alimentación, reflujo y carga térmica en el hervidor) y, como respuestas, las purezas de etanol en los productos de destilado y fondos (x_D y x_B). Es importante mantener desactivado el controlador de presión PIC-101 durante las tres pruebas para que las variables varíen de manera independiente y evitar que sean afectadas las salidas del sistema. En (3) se presenta la ecuación de normalización, antes de pasar a la identificación del modelo, pues las variables de entrada y de salida deben estar en las mismas unidades.

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \qquad (3)$$

Una vez establecido el sistema de primer orden y las unidades en las que se deben de encontrar las entradas y salidas, se obtiene una matriz de funciones de transferencia como se presenta en (4).

$$\begin{bmatrix} x_D \\ x_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ Q_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{31} \\ G_{32} \end{bmatrix} F \qquad (4)$$

Para la estimación de las funciones de transferencia se utiliza la herramienta *System Identification* de MATLAB. La ventana de trabajo de esta herramienta se muestra en la Figura 4. Una vez que los datos han sido normalizados, se cargan al entorno mediante la opción en el recuadro de *Import data* donde son definidas las señales de entras-salidas y el tiempo de muestreo.

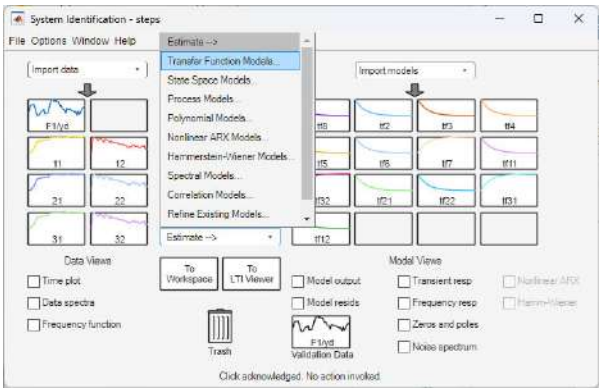


Figure 4. Ventana de sistemas de identificación en ambiente de MATLAB

Posteriormente, se arrastra una de las funciones al recuadro central y se selecciona *Estimate→Transfer Function Models*. Se abrirá una nueva venta en la que se permitirá configurar si el sistema es discreto o continuo, así como el número de polos y ceros. Para este caso de estudio se eligió un modelo FOPDT en modo continuo con un polo y ningún cero. Los resultados de la estimación se visualizan en el panel derecho, como se muestra en la Figura 4.

Una vez que se han calculado las estimaciones del modelo al hacer doble clic a una de ellas se abrirá una ventana como se muestra en la Figura 5, se visualizan los datos de la función de transferencia.

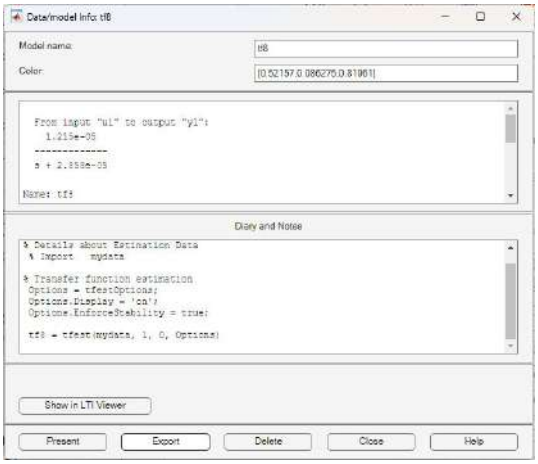


Figure 5. Ventana de resultados de identificación de modelos FOPDT en ambiente de MATLAB

Las funciones de transferencia se obtienen utilizando la ecuación que representa el modelo matemático que aparece en el recuadro superior, aplicando las siguientes operaciones (5) y (6) para calcular K y τ.

$$K = \frac{numerador}{denominador} \tag{5}$$

$$\tau = \frac{1}{denominador} \tag{6}$$

Además de estos valores, este modelo proporciona valores del tiempo muerto L, el porcentaje de ajuste FIT [%], el cual representa qué tan buena es la estimación de los datos de las salidas reales, los valores que validan una buena estimación se consideran mayores o iguales al 70%.

Otro valor relevante es el FPE (*Final Predictor Error*) es una métrica que penaliza el error de predicción, así como la complejidad del modelo, cuanto menor sea, mejor es el modelo en términos de la capacidad predictiva y la simplicidad. Finalmente, el MSE (*Mean Squared Error*), es el promedio de las diferencias entre la salida real y salida estimada, se requieren números pequeños para que sea preciso.

4. DISEÑO DE CONTROLADOR MPC

El MPC se fundamenta en utilizar un modelo matemático que describe la dinámica del sistema. Este modelo puede obtenerse mediante un proceso de identificación a partir de datos experimentales o de simulación que reflejan el comportamiento real de la planta. Como ya se presentó, en este caso se realizó identificación del modelo apoyados de la caja de herramientas de Matlab. Para establecer la estructura y parámetros del MPC se utiliza la metodología descrita en Rawlings, (2000), en donde se enumeran los principios necesarios para diseñarlo.

El diseño del controlador inicia con la linealización del sistema en un punto de operación, lo que permite representarlo como un modelo lineal e invariante en el tiempo (LTI, por sus siglas en inglés). Esta representación constituye la base matemática sobre la cual se formula el controlador. Posteriormente, se lleva a cabo una clasificación de las señales del proceso, distinguiendo las variables manipuladas y las salidas controladas con el fin de estructurar adecuadamente el controlador. Una vez definido el modelo, el MPC se construye a partir de un código script en el software de MATLAB tomando como base el código que emplea Giraldo et al. (2022). Para la sintonización del controlador se utiliza la herramienta Tuning Advisor que permite ajustar los parámetros de sintonización considerando los criterios como la rapidez de respuesta, estabilidad y rechazo de perturbaciones. A continuación, se describe de manera general los parámetros críticos que requieren ser especificados (Dohnal, 2000).

El tiempo de muestreo se establece considerando entre 10 y 20 muestras que describan el tiempo de subida de la respuesta de la planta. El horizonte de predicción se fija para abarcar la respuesta transitoria completa, mientras que el horizonte de control debe ser un valor entre el 10-20% del horizonte de predicción, para garantizar un equilibrio entre el desempeño y la complejidad computacional. Los pesos de función de costo se asignan en función de los objetivos operativos: un mayor énfasis en la salida favorece el seguimiento de referencia y la robustez y suavidad en las acciones del control. Finalmente, el controlador se mejora en función de las simulaciones, introduciendo perturbaciones y cambios de consigna para evaluar el desempeño. Para cuantificar el desempeño del controlador, se emplea el criterio de ITAE (Integral of time-weighted Absolute Error) el cual penaliza de manera más severa los errores persistentes en el tiempo y favorece configuraciones que reducen desviaciones prolongadas.

5. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de la simulación dinámica, la identificación de los modelos y la aplicación del MPC, analizando el comportamiento del sistema ante perturbaciones y su efecto en la pureza de los productos.

5.1 Identificación del modelo

En las Figuras 6, 7 y 8 se presentan los comportamientos de las variables de salida (x_D y x_B) frente a perturbaciones del 10% mediante cambios escalón a las entradas de F, R y Q_B respectivamente.

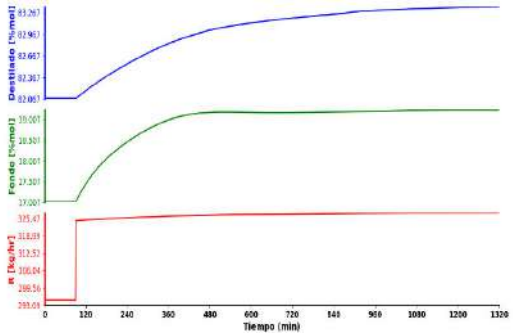


Figure 6. Respuesta escalón para R al 10% de perturbación para configuración 2

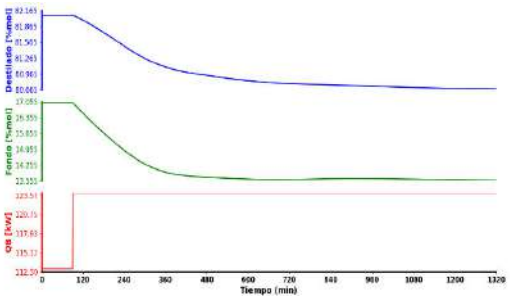


Figure 7. Respuesta escalón para QB al 10% de perturbación para configuración 2

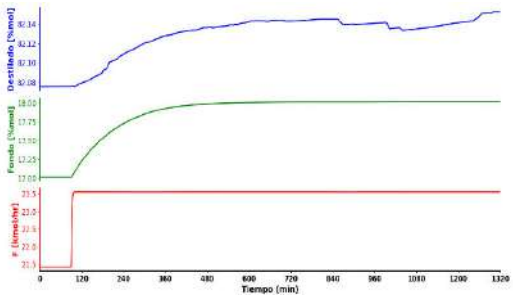


Figure 8. Respuesta escalón para F al 10% de perturbación para configuración 2

Para el caso de los 3 gráficos, la línea azul representa la pureza del etanol en el destilado, la línea verde la pureza de etanol en fondos y la línea roja la perturbación tipo escalón del 10% de perturbación. En el caso de perturbación en el reflujo en la Figura 6, las purezas en el destilado y fondo aumentan, por lo que este comportamiento sugiere que el sistema responde positivamente favoreciendo a la pureza. En la Figura 7 se muestra la respuesta del sistema ante el escalón aplicado en la carga térmica del rehervidor. Al aumentar la energía, se observa que el sistema responde negativamente, disminuyendo la pureza en el destilado y fondo. En los tres escenarios, se observa que las variables de salida presentan un tiempo de establecimiento a los 500 minutos.

En la Tabla 3 se muestran las métricas FIT, FPE MSE que sirven para determinar si el ajuste del modelo de identificación y validación es adecuado.

Tabla 3. Indicadores de calidad de estimación de modelos para configuración de simulación 1 y 2

Configuración	FIT %	FPE_{max} $x10^4$	MSE_{max} $x10^4$
1	[98.5;1.06]	615.2	613.5
2	[98.1;75.4]	59.15	58.99

Los indicadores de calidad presentan, para la configuración 1, un menor ajusté de 1.06% y uno mayor de 98.5%, mientras que, para la segunda configuración, el menor ajuste obtenido es de 75.4%. En cuanto a los errores, ambos FPE y MSE son grandes comparados con los de la primera configuración. Por lo tanto, la primera configuración no se considera para la implementación del MPC, es decir, solo se procede con el diseño del MPC considerando la segunda configuración.

En la ecuación (7) solo se coloca la matriz de transferencia de la segunda configuración, es decir, la matriz de funciones de transferencia FOPDT de acuerdo con las ecuaciones (2) y (4).

$$\begin{bmatrix} x_D \\ x_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1.0164}{281.6\,s+1} & \frac{1.0049}{116.6\,s+1} \\ -\frac{0.1797}{429.8\,s+1} & -\frac{0.0832}{226.5\,s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ Q_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{0.8781}{190.5\,s+1} \\ \frac{1.0014}{117.6\,s+1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

En cuanto a las funciones de transferencia, se observa que las constantes de tiempo son grandes (superiores a 100 minutos), los cual se refleja en la respuesta lenta del sistema ante perturbaciones, como se muestran en los gráficos donde las variables tardan en alcanzar su estado estable a los 500 minutos.

5.2 Implementación y respuesta del MPC

Se evaluó la repuesta del proceso con el MPC cuando se le aplica una perturbación de tipo rampa del 1% con una duración de 35 minutos, tanto en la referencia para la pureza de destilado como en fondos. Las Figuras 9 y 10 muestran la evolución temporal de la referencia para el destilado.

La Figura 10 muestra la evolución del fondo. Esta y la anterior figura muestran que el proceso ante esos cambios de referencia se alcanza el nuevo valor objetivo en menos de 30 minutos, manteniendo estabilidad hasta el final del horizonte de la simulación.

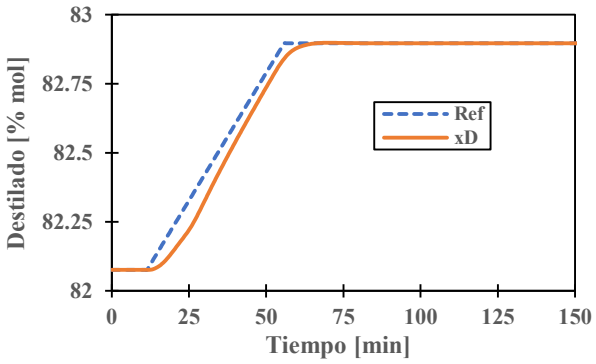


Figura 9. Cambio rampa 1 % para salida para destilado

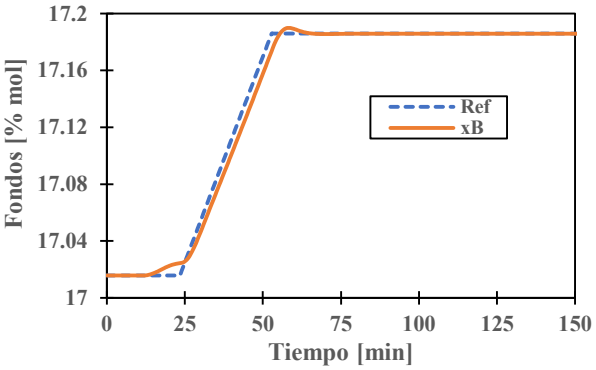


Figura 10. Cambio rampa 1 % para salida para fondo

Para el caso de las variables manipuladas, en la Figura 11 se muestra el cambio en la variable de entrada R presenta una respuesta dinámica ante la perturbación tipo rampa del 1%, en la que se observa una caída seguida de un incremento pronunciado, alrededor de los 360 minutos, lo que sugiere una acción correctiva del sistema frente a la desviación inicial. En cierto punto, *R* tiende a estabilizarse en un nuevo valor, manteniendo las oscilaciones menores, indicando un régimen cuasi estacionario.

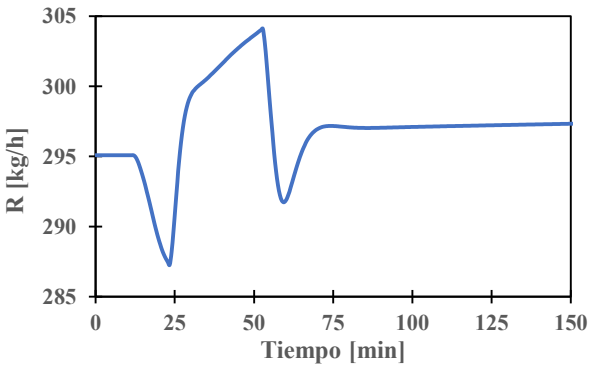


Figura 11. Variable manipulada R a la entrada del controlador MPC ante cambio del 1% en pureza de destilado y fondo.

En la Figura 12 se presenta variable manipulada de la carga térmica del rehervidor, al igual que el comportamiento de la variable R, en este se presenta una caída inicial en el momento en la que se realiza el cambio de rampa, y posterior presenta un cambio progresivo con un pico transitorio, siguiendo de una estabilización.

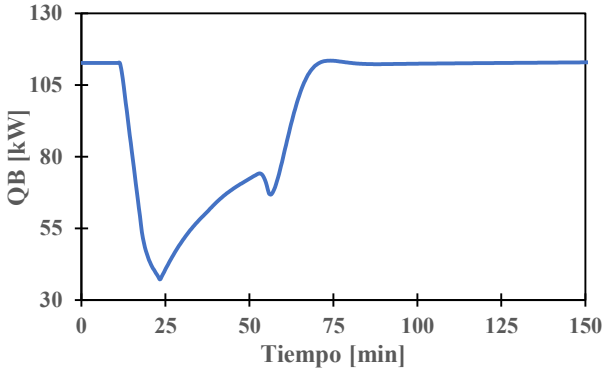


Figura 12. Variable manipulada QB a la como entrada del controlador MPC ante cambio del 1% en pureza de destilado y fondo.

Este comportamiento refleja una adaptación progresiva del sistema, posiblemente influenciada por restricciones operativas o por acción del controlador en la compensación de la perturbación. Para el caso de las salidas y de manera general, se observa que ambas se siguen de manera adecuada la rampa, sin sobre-tiro significativo, mientras que las variables manipuladas presentan picos iniciales que no alcanza los niveles de saturación, la carga térmica Q_B presenta un ligero sobre impulso negativo al inicio, seguido de una estabilización seguida, muestras que el reflujo R se mantienen en una evolución más contenida, alcanzando en un valor estable. En la tabla 4 se presenta los parámetros de sintonización que fueron seleccionados con base en los criterios de estabilidad, rapidez de respuesta y penalización del esfuerzo de control, el tiempo de muestreo es de 36 segundos.

Tabla 4. Parámetros de sintonización

Parámetro	Valor
Horizonte de predicción	40
Horizonte de control	8
Pesos de salidas	[20;18]
Pesos en las variaciones de entrada	[0.05;0.01]

El ITAE obtenido fue de 1.4 y, haciendo una comparativa con los gráficos, el sistema logra seguir la referencia con errores pequeños y estos se corrigen en un corto tiempo, el sistema no cuenta con oscilaciones y el controlador está logrando un balance entre rapidez y suavidad de respuesta. Esta adaptación de respuesta hacia la consigna se muestra en ambas respuestas de las señales controladas.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó la identificación y control de una columna de destilación binaria azeotrópica para lograr una

pureza del 82% mol de etanol. El control dinámico de columnas de destilación azeotrópicas presenta retos significativos debido a la no linealidad, el fuerte acoplamiento entre variables y el mal condicionamiento. Los controladores convencionales muestran limitaciones ante estas condiciones, es por ello que se implementó, a través de simulación en Matlab, un esquema de control predictivo basado en el modelo (MPC), modelo identificado apropiadamente por medio de la plataforma de identificación que contiene Matlab. El controlador propuesto presenta un buen desempeño considerando un bajo error ante cambios en el flujo de alimentación (que representa la perturbación que puede sufrir el proceso de destilación).

Trabajos futuros consideran la comparación de desempeño entre el mismo esquema con diferentes valores de parámetros del controlador, así como comparación con sistemas convencionales para corroborar su superioridad de acuerdo con lo indicado en la bibliografía del área. El empleo del MPC implica varios parámetros de sintonía que requieren de la observación del comportamiento final de las variables de interés, por lo que se trabaja actualmente en la implementación directa en el simulador Unisim.

REFERENCIAS

Abrams, D.S. and Prausnitz, J.M., 1975. Statistical thermodynamics of liquid mixtures: A new expression for the excess Gibbs energy of partly or completely miscible systems. *AIChE Journal*, 21(1), pp.116–128. https://doi.org/10.1002/aic.690210115

Anwari, S., 2006. Implementation of neural predictive control to distillation column. *Reaktor*, 10(1), pp.24–30.

Biegler, L.T., 2021. A perspective on nonlinear model predictive control. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 38(7), pp.1317–1332. https://doi.org/10.1007/s11814-021-0791-7

Darby, M.L., 2014. Industrial MPC of continuous processes. In: Baillieul, J. and Samad, T. (eds.), *Encyclopedia of Systems and Control*. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5102-9_242-1

Desborough, L.A. and Miller, R., 2002. Increasing customer value of industrial control performance monitoring—results of industrial surveys. *Computers & Chemical Engineering*, 26(2), pp.249–260.

Dohnal, F. and Řeřucha, V., 2000. Practical aspects of digital control system design—Sampling period choice. *IFAC Proceedings Volumes*, 33(1), pp.219–223. https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)35617-3

Gil, I.D., Gómez, J.M. and Rodríguez, G., 2012. Control of an extractive distillation process to dehydrate ethanol using glycerol as entrainer. *Computers & Chemical Engineering*, 39, pp.129–142. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.01.006

Giraldo, S.A.C., Melo, P.A. and Secchi, A.R., 2022. Tuning of model predictive controllers based on hybrid optimization. *Processes*, 10(2), p.351. https://doi.org/10.3390/pr10020351

Gmehling, J., Onken, U., & Arlt, W. (1990) "Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection" DECHEMA Chemistry Data Series, Vol. I, Part 1

Kiss, A.A. and Ignat, R.M., 2013. Optimal economic design of an extractive distillation process for bioethanol dehydration. *Energy Technology*, 1(2-3), pp.166–170. https://doi.org/10.1002/ente.201200053

Luyben, W.L., 1993. *Practical distillation control*. Springer, Boston.

Luyben, W.L. and Chien, I-L., 2006. *Design and control of distillation systems for separating azeotropes*. Wiley-AIChE, New York.

Pathiran, A.R., 2017. Effect of dead-time approximation on controller performance/robustness designed for a first order plus dead-time model. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 7(3), pp.1–6.

Rawlings, J.B., 2000. Tutorial overview of model predictive control. *IEEE Control Systems Magazine*, 20(3), pp.38–52. https://doi.org/10.1109/37.845037

Treybal, R.E., 1980. *Mass-Transfer Operations*. 3rd ed. McGraw-Hill, New York.

Tututi-Avila, S., Jiménez-Gutiérrez, A. and Hahn, J., 2014. Control analysis of an extractive dividing-wall column used for ethanol dehydration. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*.

Tyreus, B. D., & Luyben, W. L., 1992. Tuning PI controllers for integrator/dead time processes. Industrial & Engineering Chemistry Research, 31(11), 2625-2628. https://doi.org/10.1021/ie00011a029

Uddin, F., Tufa, L. D., Shah Maulud, A., & Taqvi, S. A., 2018. System behavior and predictive controller performance near the azeotropic region. Chemical Engineering & Technology, 41(4), 806-818. https://doi.org/10.1002/ceat.201700282

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Impact of an Aloe vera-based coating on the post-harvest preservation of raspberries: a study of the Centennial and 1473 varieties

De la Cruz-Sánchez Alma Marcela[*]. Langarica-Rivera Víctor Manuel*. Jorge Alberto Cárdenas Magaña*. Mojica-Sánchez Juan Pablo[*, **]

[*]*Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula., Carretera Tamazula-Santa Rosa No. 329, C. P. 49650, Tamazula de Gordiano, Jalisco, México (juan.mojica@tecmm.edu.mx, corresponding author).*

[**]*Universidad de Guadalajara, CUSUR. Av. Enrique Arreola Silva No. 883, Colonia Centro, C. P. 49000, Ciudad Guzmán, Jalisco, México.*

Abstract: This study evaluated the effect of an edible Aloe vera-based coating (AloeCoat) on the postharvest preservation of two raspberry (Rubus idaeus) cultivars: Centennial and 1473. Three treatments were applied: a full-strength coating, a 1:1 AloeCoat-water dilution, and an uncoated control. Physicochemical parameters (pH, °Brix, titratable acidity, citric and malic acids, and maturity index) were monitored over 10 days of storage. Results showed that the diluted AloeCoat treatment was the most effective in slowing quality degradation, maintaining better fruit appearance and extending shelf life up to 10 days. Significant differences ($p<0.05$) were observed between the control and coated groups, particularly from day 4 onward. This work highlights the potential of Aloe vera coatings as a natural, sustainable strategy to reduce postharvest losses in highly perishable fruits like raspberries.

Keywords: Frambuesa, Aloe vera, recubrimiento comestible, vida de anaquel, conservación postcosecha

1. INTRODUCTION

La frambuesa (*Rubus idaeus*) es un fruto altamente valorado por su sabor, textura y contenido nutricional, incluyendo compuestos fenólicos con actividad antioxidante. Esta fruta ha adquirido relevancia económica en mercados nacionales e internacionales (Leoni et al., 2024), particularmente en regiones productoras como el sur de Jalisco (Macías-Macías & Sevilla-García, 2021), México. No obstante, su estructura frágil, alto contenido de agua y velocidad de maduración la convierten en un producto sumamente perecedero, con una vida de anaquel que, sin tratamientos, rara vez supera los cuatro días (Shah et al., 2023).

En 2023, la producción nacional de frambuesa superó las 190 mil toneladas, manteniendo un crecimiento sostenido tanto en superficie cultivada como en valor económico (SIAP, 2025). No obstante, se estima que hasta un 28% de los alimentos producidos en el estado de Jalisco se desperdician, principalmente debido a deficiencias en el manejo postcosecha y en las etapas iniciales de producción, como se destaca en los estudios sobre pérdidas agrícolas en la región (SIPRA, 2019). Esta problemática evidencia la urgencia de implementar tecnologías y prácticas que prolonguen la vida útil de frutos altamente perecederos, sin comprometer su inocuidad ni generar residuos químicos.

Una de las alternativas más prometedoras es el uso de recubrimientos comestibles a base de compuestos naturales, que funcionan como una barrera semipermeable, permitiendo reducir la tasa de respiración, la pérdida de agua y el crecimiento microbiano (Vázquez-Briones & Guerrero-Beltrán, 2013). Entre estos materiales, el gel de Aloe vera ha demostrado propiedades antifúngicas y antioxidantes que pueden ser aprovechadas para conservar frutas frescas (Adebayo & Olorunsogo, 2021; Alvarado-Atariguana, 2022; Álvarez-Barreto et al., 2023). Estudios previos en fresas y tomates han mostrado que recubrimientos a base de Aloe vera pueden duplicar la vida útil del fruto y mantener su firmeza, color y sabor por más tiempo (Misir et al., 2021; Sarker & Grift, 2021; Kaur et al., 2024). Pese a estos avances, la aplicación de este tipo de recubrimientos en frambuesas ha sido poco explorada, particularmente en condiciones mexicanas y en variedades como Centenial y 1473, ampliamente cultivadas por su calidad organoléptica y rendimiento agrícola.

En este estudio, se evaluó el efecto de un recubrimiento comestible formulado a base de Aloe vera (AloeCoat) sobre la vida de anaquel de las variedades de frambuesa Centennial y 1473, mediante tres tratamientos: recubrimiento puro, recubrimiento diluido (1:1) y un grupo testigo sin recubrimiento. Se monitorearon parámetros fisicoquímicos durante un periodo de diez días. Los resultados mostraron que el recubrimiento diluido fue el más eficaz, extendiendo la vida útil hasta tres veces más que en el grupo testigo y conservando valores favorables de pH, °Brix y acidez titulable. Estos hallazgos respaldan el uso de Aloe vera como una estrategia

natural y sostenible para la conservación postcosecha de frambuesas frescas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Ubicación del estudio

El trabajo experimental se realizó en el Laboratorio de Agrobiotecnología del Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Tamazula, Jalisco, México. Las variedades de frambuesas Centennial y 1473 fueron proporcionadas por la empresa Hortrifut ABA, ubicada en el municipio de Zapotlán el Grande, Jalisco (Figura 1).

Figura 1. Hectáreas del rancho Hortrifut destinadas a la producción de frambuesa, localización 19°39'05.6"N 103°30'12.9"W.

2.2 Material vegetal

Se emplearon frutos frescos de frambuesa (*Rubus idaeus*) de dos variedades comerciales: Centennial y 1473. Los frutos fueron recolectados manualmente en estado óptimo de madurez, seleccionando únicamente aquellos sin daños visibles, con tamaño y color homogéneos, y descartando cualquier fruto sobremaduro o con signos de deterioro. Los frutos seleccionados se empaquetaron en Clamshells y en condiciones de la cadena de frio hasta su recepción en el laboratorio de Instituto Tecnológico.

2.3 Formulación de tratamientos

Se establecieron tres tratamientos experimentales con el objetivo de evaluar el efecto de un recubrimiento comestible en la conservación postcosecha de frambuesas. La Tabla 1 presenta una descripción detallada de cada tratamiento junto con su respectiva abreviación:

Tabla 1. Descripción de los tratamientos aplicados a las frambuesas

Tratamiento	Abreviación	Descripción
Recubrimiento total	RT	Inmersión en 200 mL de AloeCoat puro
Recubrimiento diluido	RD	Inmersión en una mezcla 1:1 de AloeCoat (100 mL) y agua destilada (100 mL)
Testigo (sin recubrimiento)	T	Frutas sin tratamiento, utilizadas como control negativo

Nota: El producto utilizado, AloeCoat, es un recubrimiento comestible elaborado a base de extracto de Aloe vera, formulado por la empresa ALOE ECO PARK SAPI DE CV.

2.4 Aplicación del tratamiento y diseño experimental

Las frambuesas fueron sumergidas en sus respectivas soluciones de recubrimiento durante 30 segundos a temperatura ambiente. Posteriormente, se colocaron sobre bandejas limpias para escurrir el exceso de recubrimiento y se almacenaron en refrigeración a 4 ± 1 °C y 90 % de humedad relativa (Figura 2). El producto utilizado, AloeCoat, es un recubrimiento comestible elaborado a base de extracto de Aloe vera, formulado por la empresa ALOE ECO PARK SAPI DE CV. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, con tres repeticiones por tratamiento y por variedad, siendo cada repetición compuesta por 15 frutos. El almacenamiento se llevó a cabo durante 10 días, evaluándose las variables de calidad y conservación en los días 0, 4, 7 y 10. Esta metodología es consistente con estudios previos que han utilizado inmersión breve seguida de almacenamiento refrigerado para evaluar la eficacia de recubrimientos

Figura 2. Frambuesa de la variedad Centennial cosechada (a) y recubrimiento de la variedad utilizando el producto a base de Aloe vera (b) y (c).

comestibles en berries (El-Nikeety et al., 2014; Gomes et al., 2017; Chu et al., 2020; Abdullah et al., 2023).

2.5 Determinación de parámetros fisicoquímicos

Para la evaluación de los parámetros fisicoquímicos se utilizaron 15 frambuesas por repetición. Los frutos fueron procesados manualmente mediante trituración en un mortero con pistilo, con el fin de extraer el jugo fresco necesario para los análisis. Este jugo fue empleado directamente para la determinación del pH y los grados Brix. El pH se midió utilizando un potenciómetro digital de mesa LAQUA PH1500, previamente calibrado con soluciones buffer estándar. Por su parte, los sólidos solubles totales (°Brix) se determinaron con un refractómetro manual portátil ATAGO MASTER-53M, aplicando una alícuota del jugo directamente sobre el prisma de lectura del instrumento previamente limpio y seco. La acidez titulable se cuantificó siguiendo los lineamientos establecidos en la norma mexicana NMX-FF-010-1982. Para ello, se tomó una alícuota de 10 mL del jugo homogeneizado y se diluyó en 50 mL de agua destilada. Posteriormente, la muestra fue titulada con una solución de hidróxido de sodio (NaOH 0.1 N), utilizando fenolftaleína como indicador. El punto final de la titulación se identificó por el cambio de coloración a rosa pálido persistente. Los contenidos de ácidos orgánicos (cítrico y málico) se calcularon a partir de los datos de la titulación, aplicando los factores de conversión correspondientes: 0.064 para ácido cítrico y 0.067 para ácido málico, también conforme a lo indicado en la NMX-FF-010-1982. Finalmente, se calculó el índice de madurez como el cociente entre los °Brix y la acidez titulable (°Brix/acidez), con

el propósito de evaluar el equilibrio entre dulzor y acidez, considerado un parámetro clave en la calidad sensorial del fruto.

2.6 Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey para la comparación de medias, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. El procesamiento estadístico y gráficos se realizaron en el entorno de desarrollo RStudio (Kronthaler & Zöllner, 2021) utilizando el lenguaje de programación R.

2.6 Análisis sensorial

Se realizó una evaluación sensorial con el objetivo de valorar la aceptabilidad de las frambuesas recubiertas con AloeCoat, en comparación con el tratamiento testigo (sin recubrimiento). Para ello, se seleccionaron los frutos correspondientes al día 10 de almacenamiento, y se incluyeron los tres tratamientos: testigo (T), AloeCoat diluido (RD) y AloeCoat total (RT). La evaluación fue llevada a cabo por un panel sensorial no entrenado compuesto por 15 jueces voluntarios. Cada juez recibió tres muestras de frambuesa (una por tratamiento), presentadas en condiciones controladas y codificadas con números aleatorios de tres dígitos para evitar sesgos. Los jueces evaluaron cada muestra de forma independiente, calificando los atributos de color, olor, sabor y textura mediante una escala hedónica de 5 puntos (Tabla 2).

Tabla 2. Escala hedónica utilizada para la evaluación sensorial de frambuesas tratadas con AloeCoat.

Puntaje	Descripción
1	No me agrada
2	No muy bueno
3	Regular
4	Me gusta poco
5	Me gusta mucho

Los datos obtenidos de cada juez fueron recopilados en una matriz de calificaciones por atributo y tratamiento, permitiendo la comparación directa entre las muestras evaluadas. Debido a que los valores registrados correspondían a una escala hedónica ordinal (del 1 al 5), y que cada juez evaluó las tres muestras (testigo, AloeCoat diluido y AloeCoat total), se aplicó un diseño de medidas repetidas. Por lo tanto, los resultados fueron analizados mediante la prueba no paramétrica de Friedman, adecuada para datos relacionados y sin requerimientos de normalidad. Posteriormente, para determinar específicamente entre qué tratamientos existían diferencias significativas, se utilizó una comparación múltiple post hoc mediante la prueba de Dunn con ajuste de Bonferroni. Las medias de cada atributo sensorial fueron expresadas como media ± desviación estándar, y las diferencias estadísticas se representaron con letras distintas (a, b, c), asignadas según el resultado del análisis post hoc.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Determinación de parámetros fisicoquímicos

Los resultados muestran que el recubrimiento comestible AloeCoat tuvo un efecto positivo en la conservación postcosecha de frambuesas. Al comparar los tres grupos evaluados, recubrimiento total (RT), recubrimiento diluido (RD, 1:1) y testigo sin tratamiento (T), se observó que el tratamiento diluido fue el más eficaz en ambas variedades (*Centennial* y *1473*), logrando extender la vida de anaquel hasta los 10 días, con mejor apariencia visual y menor deterioro fisicoquímico. El cambio del pH evidenció un aumento gradual durante el almacenamiento, comportamiento esperado en frutos no climatéricos, donde la degradación de ácidos orgánicos provoca un incremento en los valores de pH (Shah et al., 2023; Piston et al., 2021; Alvarado-Atariguana, 2022). En *Centennial*, el pH del grupo testigo se elevó de 3.05 a 3.35, mientras que en el tratamiento con AloeCoat diluido se incrementó levemente hasta 3.32. En 1473, el aumento fue aún más pronunciado en el grupo con recubrimiento total (3.10 a 3.97), indicando que esta formulación pudo haber sido menos efectiva en esa variedad específica, posiblemente por una menor adherencia o mayor transpirabilidad del recubrimiento (Tabla 3). Los análisis estadísticos (ANOVA y prueba de Tukey, $\alpha = 0.05$) mostraron diferencias significativas a partir del día 4 entre el testigo y el recubrimiento diluido en ambas variedades ($p < 0.05$), lo que sugiere que el efecto del Aloe vera comienza a ser detectable en las primeras etapas del almacenamiento, observándose una desaceleración en el aumento del pH en frutos tratados. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Álvarez-Barreto et al. (2023), quienes identificaron que las fresas recubiertas con geles de Aloe vera presentaron un menor incremento del pH durante el almacenamiento, en comparación con las muestras sin recubrimiento.

Tabla 3. Valores de pH (±DE) en frambuesas durante el almacenamiento.

	Frambuesa *Centennial*			Frambuesa *1473*		
Día	T	RD	RT	T	RD	RT
0	3.05 ± 0.10	3.05 ± 0.11	3.05 ± 0.12	3.10 ± 0.12	3.10 ± 0.10	3.10 ± 0.11
4	3.20 ± 0.15	3.15 ± 0.12	3.14 ± 0.13	3.25 ± 0.14	3.20 ± 0.12	3.70 ± 0.16
7	3.30 ± 0.14	3.25 ± 0.13	3.19 ± 0.11	3.30 ± 0.13	3.25 ± 0.10	3.93 ± 0.18
10	3.35 ± 0.16	3.32 ± 0.15	3.40 ± 0.17	3.35 ± 0.15	3.30 ± 0.13	3.97 ± 0.20

El contenido de °Brix, que refleja principalmente los azúcares disponibles, disminuyó progresivamente en todos los tratamientos, siendo más notoria esta reducción en los frutos sin recubrimiento. En Centennial, el grupo testigo descendió de 9.0 a 5.0 °Brix, mientras que el tratamiento diluido conservó 5.6 al final del almacenamiento. En 1473, el AloeCoat diluido mantuvo un nivel de 7.0, frente a los 4.0 observados en el grupo testigo (Tabla 4). Esta reducción se atribuye al consumo de azúcares durante la respiración y a la pérdida de agua por transpiración. La capacidad del Aloe vera para reducir estos procesos ha sido ampliamente documentada (Restrepo & Aristizábal, 2010; Kaur et al., 2024). El análisis estadístico demostró diferencias altamente significativas desde el día 4, con valores de $p < 0.001$ entre el testigo y el tratamiento diluido, lo que refuerza la eficacia de este recubrimiento para preservar compuestos solubles.

Tabla 4. Valores de °Brix (±DE) en frambuesas durante el almacenamiento.

	Frambuesa *Centennial*			Frambuesa *1473*		
Día	T	RD	RT	T	RD	RT
0	9.0 ± 0.10	9.0 ± 0.10	9.0 ± 0.12	9.0 ± 0.11	9.0 ± 0.13	9.0 ± 0.12
4	9.6 ± 0.12	9.0 ± 0.13	9.6 ± 0.15	9.6 ± 0.13	7.2 ± 0.10	7.2 ± 0.13
7	8.5 ± 0.14	8.6 ± 0.12	7.0 ± 0.16	7.0 ± 0.15	9.0 ± 0.14	8.0 ± 0.12
10	5.0 ± 0.16	5.6 ± 0.15	4.0 ± 0.17	4.0 ± 0.18	6.0 ± 0.14	6.0 ± 0.15

La acidez titulable, expresada como porcentaje de ácido cítrico equivalente, también mostró una tendencia decreciente a lo largo del experimento. En Centennial, el grupo testigo disminuyó de 5.0 % a 3.5 %, mientras que el tratamiento diluido retuvo un 4.0 % al día 10. Comportamientos similares se observaron en 1473, donde el grupo tratado mantuvo valores significativamente mayores (Tabla 5). Dado que la acidez es un parámetro crítico para la percepción sensorial del sabor, la conservación de este atributo es fundamental para la aceptabilidad del fruto. El uso del Aloe vera contribuyó a retardar esta pérdida, probablemente por su capacidad para limitar la actividad enzimática y la oxidación de compuestos orgánicos (Shah et al., 2023; Piston et al., 2021; Alvarado-Atariguana, 2022). El análisis ANOVA mostró diferencias significativas entre tratamientos a partir del día 4 en ambas variedades ($p = 0.01$ y $p = 0.03$), con valores consistentemente más altos en el grupo con AloeCoat diluido.

Tabla 5. Valores de acidez titulable (±DE) en frambuesas durante el almacenamiento.

	Frambuesa *Centennial*			Frambuesa *1473*		
Día	T	RD	RT	T	RD	RT
0	5.0 ± 0.12	5.0 ± 0.10	5.0 ± 0.11	5.0 ± 0.11	4.8 ± 0.10	4.8 ± 0.12
4	4.0 ± 0.13	4.5 ± 0.12	4.5 ± 0.13	4.5 ± 0.11	4.5 ± 0.12	4.5 ± 0.14
7	3.7 ± 0.14	4.2 ± 0.13	4.15 ± 0.11	4.15 ± 0.12	4.2 ± 0.12	4.15 ± 0.13
10	3.5 ± 0.15	4.0 ± 0.13	3.8 ± 0.14	3.8 ± 0.14	4.0 ± 0.11	4.0 ± 0.13

La acidez se expresa en porcentaje de ácido málico por 100 gramos de material vegetal fresco (% ac. málico/100g).

En todos los tratamientos, se observó una disminución progresiva del contenido de ácido cítrico conforme avanzaron los días de almacenamiento (Figura 3). Los valores iniciales fueron homogéneos (~5.0%) pero, al día 10, los tratamientos sin recubrimiento como Centennial T presentaron las concentraciones más bajas (~3.5%). En contraste, los tratamientos con recubrimiento, en especial 1473 RT, mostraron una menor tasa de pérdida, indicando un mejor control del metabolismo de los ácidos orgánicos.

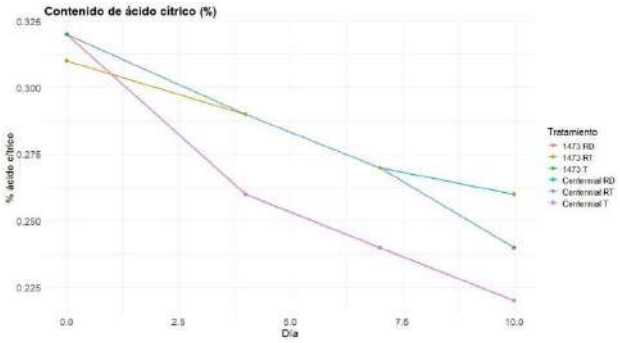


Figura 3. Evolución del contenido de ácido cítrico en función del tiempo de almacenamiento para los distintos tratamientos evaluados.

El índice de madurez (°Brix/acidez) mostró una tendencia creciente en todos los tratamientos (Figura 4), siendo más acelerada en los frutos sin recubrimiento, que alcanzaron los valores más altos al día 10. Esto sugiere un proceso de maduración más rápido. Por el contrario, los tratamientos RT mantuvieron un índice más bajo y estable, indicando que el recubrimiento actuó como barrera que retrasa los procesos de maduración. La variedad 1473 presentó un comportamiento más uniforme y estable a lo largo del tiempo.

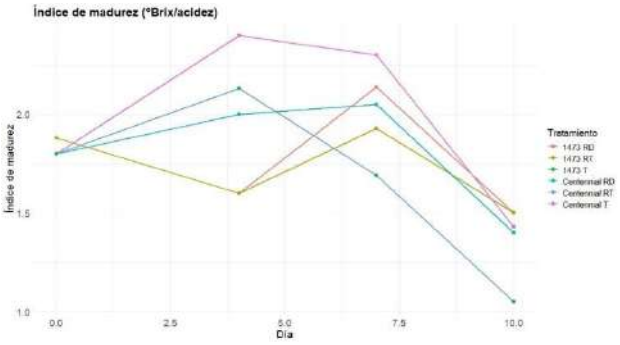


Figura 4. Índice de madurez determinado por la relación °Brix/acidez titulable, en función del tiempo y tratamiento.

La disminución en la concentración de los ácidos orgánicos es consistente con lo reportado por Kader (2002), quien explica que estos compuestos son utilizados como sustrato respiratorio durante el almacenamiento. La pérdida de ácidos orgánicos en frutas sin tratamiento refleja una mayor tasa metabólica, lo que acelera el proceso de senescencia. Los resultados muestran que el uso de recubrimientos, especialmente el tratamiento RT, retarda significativamente la degradación de los ácidos cítrico y málico. Esto puede explicarse por la capacidad del recubrimiento de reducir la permeabilidad al oxígeno y limitar la respiración del fruto, como se ha documentado en estudios con recubrimientos de almidón, cera o quitina (Baldwin et al., 1995; Vargas et al., 2008).

El índice de madurez, al ser una relación entre sólidos solubles y acidez, es un buen indicador de la evolución fisiológica del fruto. En este estudio, el aumento del índice fue más acelerado en ausencia de recubrimientos, lo cual indica un mayor grado de maduración o incluso sobremaduración. Por el contrario,

los frutos con recubrimiento conservaron su calidad y madurez por más tiempo, lo cual es deseable para la comercialización. Además, se detectaron diferencias varietales en la respuesta a los tratamientos. La variedad 1473 mostró mayor estabilidad en los tres parámetros evaluados (Figura 5), lo que sugiere una interacción positiva entre su fisiología y los recubrimientos utilizados. Esta información es relevante para el diseño de estrategias de conservación diferenciadas por variedad

Figura 5. Día número 10 de la variedad de frambuesa 1473, de izquierda a derecha testigo, recubrimiento total y recubrimiento diluidos.

3.2 Resultados del análisis sensorial

Los resultados del análisis sensorial para la variedad Centennial realizado al día 10 de almacenamiento mostraron diferencias significativas en la aceptación de los frutos entre los distintos tratamientos. En general, los frutos tratados con el recubrimiento AloeCoat diluido (RD) obtuvieron las calificaciones más altas en todos los atributos evaluados (color, olor, sabor y textura), seguidos por el tratamiento con AloeCoat total (RT) y, finalmente, por el testigo sin recubrimiento (T), que recibió las calificaciones más bajas. El análisis estadístico mediante la prueba de Friedman reveló diferencias significativas ($p < 0.05$) en todos los atributos sensoriales. La prueba post hoc de Dunn con corrección de Bonferroni confirmó que las diferencias se daban principalmente entre el tratamiento testigo y los dos tratamientos con recubrimiento, siendo el AloeCoat diluido el más aceptado por el panel de jueces.

Las medias y desviaciones estándar de los puntajes obtenidos se presentan en la Tabla 7. Para el atributo color, el tratamiento RD obtuvo una media de 4.3 ± 0.5, significativamente superior al testigo (3.1 ± 0.6). En sabor, uno de los atributos más críticos para la aceptación del consumidor, el tratamiento RD alcanzó una media de 4.5 ± 0.4, frente a 3.0 ± 0.5 del testigo. Resultados similares se observaron en textura (RD: 4.2 ± 0.6 vs. T: 2.8 ± 0.7), evidenciando el efecto protector del recubrimiento en la calidad organoléptica (Tabla 6).

Tabla 6. Valores de acidez titulable (±DE) en frambuesas durante el almacenamiento.

Atributo	Testigo (T)	AloeCoat Diluido (RD)	AloeCoat Total (RT)
Color	3.1 ± 0.6^{b}	4.3 ± 0.5^{a}	3.8 ± 0.4^{ab}
Olor	3.0 ± 0.5^{b}	4.2 ± 0.6^{a}	3.6 ± 0.5^{ab}
Sabor	3.0 ± 0.5^{b}	4.5 ± 0.4^{a}	3.9 ± 0.5^{ab}
Textura	2.8 ± 0.7^{b}	4.2 ± 0.6^{a}	3.7 ± 0.6^{ab}

Nota: las letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas, $p < 0.05$, prueba de Dunn con ajuste de Bonferroni.

Estos resultados respaldan la eficacia del AloeCoat, particularmente en su formulación diluida, para preservar atributos sensoriales deseables en frambuesas almacenadas por 10 días. El recubrimiento pudo haber limitado la pérdida de humedad, la oxidación y el deterioro visual, contribuyendo a una mejor experiencia sensorial para los consumidores. Para la variedad 1473, los resultados del análisis sensorial también mostraron diferencias significativas entre tratamientos al día 10 de almacenamiento. En este caso, los frutos tratados con el recubrimiento AloeCoat diluido (RD) obtuvieron calificaciones altas en todos los atributos, aunque ligeramente inferiores a las obtenidas en la variedad Centennial. El tratamiento con AloeCoat total (RT) también mejoró la aceptabilidad sensorial respecto al testigo (T), que nuevamente recibió los puntajes más bajos. La prueba no paramétrica de Friedman mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) en todos los atributos evaluados, y la comparación post hoc de Dunn con corrección de Bonferroni confirmó diferencias significativas entre el grupo testigo y los tratamientos con recubrimiento. Sin embargo, en la variedad 1473, la diferencia entre los tratamientos RD y RT fue menor, lo que sugiere una respuesta más estable al uso del recubrimiento. Las medias y desviaciones estándar obtenidas se presentan en la Tabla 7. En color, el tratamiento RD obtuvo una media de 4.1 ± 0.4, mientras que el testigo se calificó con 3.3 ± 0.5. En sabor, RD alcanzó una media de 4.2 ± 0.4, frente a 3.1 ± 0.4 del grupo sin recubrimiento. La textura fue el atributo mejor evaluado para esta variedad, con una media de 4.3 ± 0.4 en el tratamiento RD, en comparación con 3.0 ± 0.5 en el testigo.

Tabla 7. Resultados del análisis sensorial (media ± DE) de frambuesas tras 10 días de almacenamiento de la variedad 1473.

Atributo	Testigo (T)	AloeCoat Diluido (RD)	AloeCoat Total (RT)
Color	3.3 ± 0.5^{b}	4.1 ± 0.4^{a}	3.9 ± 0.3^{ab}
Olor	3.1 ± 0.4^{b}	4.0 ± 0.5^{a}	3.7 ± 0.4^{ab}
Sabor	3.1 ± 0.4^{b}	4.2 ± 0.4^{a}	3.8 ± 0.5^{ab}
Textura	3.0 ± 0.5^{b}	4.3 ± 0.4^{a}	3.9 ± 0.5^{ab}

Nota: las letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas, $p < 0.05$, prueba de Dunn con ajuste de Bonferroni.

Estos hallazgos indican que la variedad 1473 también se benefició sensorialmente del uso de AloeCoat, especialmente en su versión diluida, aunque las diferencias entre tratamientos fueron ligeramente menos marcadas que en Centennial. Esto podría atribuirse a una respuesta varietal diferencial en cuanto a la retención de compuestos volátiles y características estructurales del fruto.

4. CONCLUSIONES

El recubrimiento comestible a base de Aloe vera (AloeCoat), especialmente en su formulación diluida, demostró ser una estrategia eficaz para conservar la calidad postcosecha de frambuesas de las variedades Centennial y 1473. Este tratamiento permitió retardar la pérdida de firmeza, reducir el deterioro químico y mantener atributos clave como el pH, los sólidos solubles y la acidez titulable durante el periodo de almacenamiento. Además, se observó un efecto positivo en la conservación de los ácidos cítrico y málico, así como en el índice de madurez, lo cual repercute directamente en una mayor vida de anaquel. Desde el punto de vista sensorial, ambas variedades mostraron una mayor aceptabilidad cuando fueron tratadas con AloeCoat, particularmente en su versión diluida. En la variedad Centennial se observaron puntajes sensoriales más altos, especialmente en sabor y color, mientras que la variedad 1473 presentó una respuesta más equilibrada, destacando en textura y olor. En ambos casos, el tratamiento diluido superó significativamente al testigo sin recubrimiento. Estos resultados sugieren que el uso de AloeCoat diluido puede representar una alternativa natural, accesible y sostenible para prolongar la vida útil y mejorar la calidad sensorial de frutas altamente perecederas como la frambuesa. Se recomienda su evaluación bajo condiciones comerciales reales, así como su aplicación en otras especies frutales de características similares.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa ALOE ECO PARK SAPI DE CV por la dotación del producto AloeCoat y al Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica por el apoyo a la investigación en los años 2023-2024.

REFERENCIAS

Abdullah, A. H., Awad-Allah, M. A., Abd-Elkarim, N. A., Ahmed, Z. F.,Taha, E. M. (2023). Carboxymethyl cellulose from banana rachis: A potential edible coating to extend the shelf life of strawberry fruit. Agriculture, 13(5), 1058. https://doi.org/10.3390/agriculture13051058

Adebayo, S., & Olorunsogo, S. (2021). EFFECTS OF ALOE VERA BASED EDIBLE COATING ON SHELF LIFE AND QUALITY OF TOMATOES. Proceedings of PASAE/NIAE International Conference, 2021.

Alvarado-Atariguana, D. V. (2022). Recubrimiento comestible a base de sábila (Aloe vera) y goma arábiga para incrementar la vida útil de las frambuesas (Rubus idaeus) (Tesis doctoral, Universidad Agraria del Ecuador).

Álvarez-Barreto, J. F., Cevallos-Ureña, A., Zurita, J., Pérez, J., León, M., & Ramírez-Cárdenas, L. (2023). Edible coatings of aloe vera gel and carnauba wax microparticles to increase strawberry (Fragaria ananassa) shelf life. International Journal of Fruit Science, 23(1), 181-199. https://doi.org/10.1080/15538362.2023.2180129

Antunes, L. E. C., Gonçalves, E. D., & Trevisan, R. (2006). Alterações da atividade da poligalacturonase e pectinametilesterase em amora-preta (Rubus spp.) durante o armazenamento. Current Agricultural Science and Technology, 12(1), 63–66.

Baldwin, E. A., Nisperos-Carriedo, M. O., & Baker, R. A. (1995). Edible coatings for lightly processed fruits and vegetables. HortScience, 30(1), 35-38.

Chitarra, M. I. F. (2005). Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio. Universidade Federal de Lavras.

Chu, Y., Gao, C., Liu, X., Zhang, N., Xu, T., Feng, X., Tang, X. (2020). Improvement of storage quality of strawberries by pullulan coatings incorporated with cinnamon essential oil nanoemulsion. LWT - Food Science and Technology, 134, 109054. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109054

Dirección General de Normas. (1982). NMX-FF-010-1982. Productos alimenticios para humanos–Frutas y productos derivados–Términos y definiciones (Norma Mexicana). Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

El Nikeety, A. E., Abo Bakr, A. M., & El Din, F. G. (2014). Extending shelf-life of strawberry using edible coatings. Journal of Food Science and Technology, 51(5), 865–874. https://doi.org/10.7813/2075-4124.2014/6-4/A.14

Gomes, M. D. S., Cardoso, M. D. G., Guimarães, A. C. G., Guerreiro, A. C., Gago, C. M. L., Vilas Boas, E. V. D. B., Antunes, M. D. C. (2017). Effect of edible coatings with essential oils on the quality of red raspberries over shelf-life. Journal of the Science of Food and Agriculture, 97(3), 929-938. https://doi.org/10.1002/jsfa.7817

Intagri. (2021). Manejo poscosecha de berries. Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura. https://www.intagri.com/

Kader, A. A. (2002). Postharvest technology of horticultural crops. University of California. Agriculture and Natural Resources, Publication, 3311, 535.

Kaur, N., Somasundram, C., Razali, Z., Mourad, A. H. I., Hamed, F., & Ahmed, Z. F. (2024). Aloe vera/chitosan-based edible film with enhanced antioxidant, antimicrobial, thermal, and barrier properties for sustainable food preservation. Polymers, 16(2), 242. https://doi.org/10.3390/polym16020242

Kronthaler, F., & Zöllner, S. (2021). Data analysis with RStudio. Data Analysis with RStudio.

Leoni, V., Panseri, S., Giupponi, L., Pavlovic, R., Gianoncelli, C., Coatti, G., et al. (2024). Phytochemical profiling of red raspberry (Rubus idaeus L.) honey and investigation of compounds related to its pollen occurrence. Journal of the Science of Food and Agriculture, 104(9), 5391–5406. https://doi.org/10.1002/jsfa.13375

Macías-Macías, A., & Sevilla-García, Y. L. (2021). Naturaleza vulnerada. Cuatro décadas de agricultura industrializada de frutas y hortalizas en el sur de Jalisco, México (1980-2020). EntreDiversidades. Revista de ciencias sociales y humanidades, 8(1), 64-91. https://doi.org/10.31644/ed.v8.n1.2021.a03

Misir, J., Brishti, F. H., & Hoque, M. M. (2014). Aloe vera gel as a novel edible coating for fresh fruits: A review. American Journal of Food Science and Technology, 2(3), 93-97. https://doi.org/10.12691/ajfst-2-3-3

Murray, R., Candan, A. P., & Vázquez, D. (2019). Manual de poscosecha de frutas. INTA ediciones.

NZFSA, A. (2005). Guide to Calculating the Shelf Life of Foods: Information Booklet for the Food Industry. New Zealand Food Safety Authority, PO Box, 2835.

Pistón, F., Pérez, A. G., Sanz, C., & Refoyo, A. (2021, May). Strawberry postharvest shelf life is related to total acid content and fruit firmness. In IX International Strawberry Symposium 1309 (pp. 869-872).

Restrepo, J. I., & Aristizábal, I. D. (2010). Conservación de fresa (fragaria x ananassa duch cv. camarosa) mediante la aplicación de recubrimientos comestibles de gel mucilaginoso de penca sábila (aloe barbadensis miller) y cera de carnaúba. Vitae, 17(3), 252-263.

Rodríguez, L. B. D., & de Hernández, R. M. A. (2021). Tecnologías postcosecha para promover la vida de anaquel de frutos pequeños. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, 22(1). https://www.redalyc.org/journal/813/81367929004/81367929004.pdf

Sarker, A., & Grift, T. E. (2021). Bioactive properties and potential applications of Aloe vera gel edible coating on fresh and minimally processed fruits and vegetables: A review. Journal of Food Measurement and Characterization, 15, 2119-2134. https://doi.org/10.1007/s11694-020-00802-9

Shah, H. M. S., Singh, Z., Kaur, J., Hasan, M. U., Woodward, A., & Afrifa-Yamoah, E. (2023). Trends in maintaining postharvest freshness and quality of Rubus berries. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 22(6), 4600-4643. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13235

Shah, H. M. S., Singh, Z., Kaur, J., Hasan, M. U., Woodward, A., & Afrifa-Yamoah, E. (2023). Trends in maintaining postharvest freshness and quality of Rubus berries. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 22(6), 4600-4643. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13235

Soluciones Integrales para la Problemática Ambiental, Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET), & Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2019). Diagnóstico sobre la pérdida y desperdicio de alimentos en Jalisco. Gobierno del Estado de Jalisco. https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/3.%20DiagnosticoPerdidadDesperdiciosAlimentosJalisco.pdf

Vargas, M., Pastor, C., Chiralt, A., McClements, D. J., & Gonzalez-Martinez, C. (2008). Recent advances in edible coatings for fresh and minimally processed fruits. Critical reviews in food science and nutrition, 48(6), 496-511. https://doi.org/10.1080/10408390701537344

Vázquez-Briones, M. C., & Guerrero-Beltrán, J. A. (2013). Recubrimientos de frutas con biopelículas. Temas selectos de Ingeniería de Alimentos, 7(2), 5-14.be listed in order of year of publication. If there is more than one paper by the same author(s) and with the same date, label them a, b, etc., e.g. Morris et al. (1990a, b). Please note that all references listed here must be directly cited in the body of the text.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Simulation of the separation process of biotechnological 2-Phenylethanol using UniSim Design R500

Laura Saraí Morales-Taneco* , Elsa Hynmar Fernández-Martínez*

* *Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autonoma de Tlaxcala, Calzada Apizaquito 12, CP.90401 Apizaco, Tlaxcala, Mexico (e-mail:20212774@uatx.mx)*

Abstract:This work presents the design of a separation process for 2-Phenylethanol produced by fermentation of sweet whey, an abundant agro-industrial waste in the state of Tlaxcala, Mexico. The separation sequence consists of a liquid-liquid extraction followed by two distillation columns for 2-Phenylethanol purification and solvent recovery. The use of ethyl acetate as a solvent for the extraction process was analyzed. The results, supported by the Unisim Design R500 process simulator, showed that 2-FE can be separated with a purity of 87.4% by weight. The use of ethyl acetate as a solvent was efficient in removing 2-FE from the fermentation mixture, promoting waste revaluation and aligning with circular economy principles.

Keywords: 2-Phenylethanol, whey, revalorization, liquid-liquid extraction, distillation columns, sustainability, circular economy

1. INTRODUCCIÓN

Con el actual deterioro ambiental y el consumo excesivo de recursos naturales, es esencial adoptar prácticas industriales más ecológicas. El lactosuero, un subproducto de la elaboración de queso, con potencial para generar sustancias de valor agregado mediante fermentación. Las biorrefinerías integran producción de biocombustibles y químicos de alto valor a partir de residuos, mejorando la sostenibilidad y el valor económico (Ubando et al , 2020; Wandega et al , 2020). La lactosa sirve como fuente de carbono en fermentaciones rentables, reduciendo residuos y fomentando prácticas sostenibles (Conde-Báez et al , 2017a). La demanda de compuestos aromáticos, sean naturales o sintéticos, se sustenta en su capacidad para evocar sensaciones positivas en la vida diaria. Esta relación entre olfato y bienestar impulsa el desarrollo de moléculas con perfiles odoríferos especializados. El compuesto químico 2-Feniletanol (2-FE), caracterizado por su aroma a rosas, tiene una alta demanda en las industrias alimentaria, cosmética y farmacéutica, ya que se utiliza en perfumes, jabones, detergentes, formulaciones de desodorantes e incluso como aditivo alimentario (Eshkol et al , 2009) La producción tradicional de 2-FE presenta importantes limitaciones. Por un lado, la extracción natural requiere entre 1.5 y 2 toneladas de pétalos de rosa (equivalente a 4,000-5,000 rosas) para obtener un kilogramo de esencia. Por otro lado, la síntesis química convencional depende de precursores petroquímicos y genera subproductos tóxicos (Lu et al , 2002). Ante la incapacidad de ambos métodos para satisfacer la demanda actual, se han explorado alternativas biotecnológicas, destacando la producción mediante fermentación microbiana (Jin et al , 2018).

Diversos microorganismos han demostrado capacidad para sintetizar 2-FE. Entre los más estudiados se encuentran; Levaduras como: *Saccharomyces cerevisiae* y *Kluyveromyces marxianus*, bacterias como: *Enterobacter faecium* y cepas de *Lactobacillus*. Respecto al etanol, además de la conocida producción con *S. cerevisiae*, se emplean: *Zymomonas mobilis* por su alta eficiencia, cepas termotolerantes como *Kluyveromyces marxianus*, bacterias modificadas de *Escherichia coli* y *Corynebacterium*

Varios autores han documentado la viabilidad de utilizar sustratos alternativos como el lactosuero, un subproducto de la industria láctea, para la producción de 2-FE mediante fermentación (Conde-Báez et al , 2019; Alonso-Vargas et al , 2022). Estos trabajos demuestran que el uso de residuos agroindustriales puede reducir significativamente los costos de producción mientras se valorizan desechos.

La fermentación del lactosuero dulce con Kluyveromyces marxianus, como se modeló en un trabajo previo (Morales-Taneco y Fernández-Martínez, 2025), produce no solo 2-FE sino también bioetanol como subproducto. Este enfoque dual alinea con los principios de las biorrefinerías, donde se maximiza el uso de residuos para generar productos de alto valor (Wandega et al., 2020). En Tlaxcala, donde la producción quesera artesanal genera grandes volúmenes de suero sin tratamiento, esta tecnología podría reducir el impacto ambiental (Prazeres et al., 2012).

En México, particularmente en el estado de Tlaxcala, se generan grandes cantidades de lactosuero dulce (9 L por kg de queso), con un volumen anual estimado en 108 millones de litros (Eshkol et al , 2009). Este residuo, si no se trata adecuadamente, causa graves problemas ambientales debido a su alta demanda biológica de oxígeno (DBO) de 30-5 g/L y demanda química de oxígeno (DQO) de 60-80 g/L (Prazeres et al , 2012)

La producción de aroma a rosas a partir de diferentes tipos de suero (ácido y dulce) ha sido demostrada experimentalmente por (Conde-Báez et al , 2024), como parte de los esfuerzos para revalorizar este residuo de la industria quesera.

La dificultad para producir 2-FE por esta vía radica en que el 2-FE está muy diluido en agua, por lo que uno de los principales desafíos en la producción biotecnológica de 2-FE es su baja concentración en el caldo de fermentación (generalmente inferior a 1 g/L), lo que requiere de procesos de separación eficientes y económicamente viables (Alonso-Vargas et al , 2022). Estudios previos han propuesto esquemas de separación utilizando extracción líquido-líquido seguida de destilación, demostrando su efectividad en la recuperación de 2-FE (Puga-Córdova et al , 2020).

En este contexto, la simulación de procesos surge como una herramienta indispensable para abordar los desafíos asociados con el escalado industrial de las rutas biotecnológicas. Esta metodología permite el diseño, optimización y evaluación técnico-económica integral de procesos de separación y purificación (Lu et al , 2002).

La utilidad de la simulación se manifiesta en varias capacidades clave: 1) Modelado preciso de sistemas multicomponentes no ideales, como los caldos de fermentación que contienen 2-FE, etanol, agua y otros metabolitos. 2) Optimización de las condiciones de operación (temperatura, presión, relaciones de reflujo) para una mayor recuperación y pureza del producto. 3) Predicción del comportamiento del proceso bajo una amplia gama de escenarios, lo que permite identificar cuellos de botella y evaluar la flexibilidad operativa ante variaciones en la alimentación. 4) Realización de análisis de sensibilidad para determinar el impacto económico de variables críticas, vinculando directamente parámetros de ingeniería con la rentabilidad del proceso.

Herramientas modernas como Unisim Design, Aspen Plus u SuperPro Designer son ampliamente reconocidas por su robustez en la industria. Su aplicación en el desarrollo de procesos es crucial para reducir el riesgo y el costo asociados con la experimentación a escala piloto, facilitando así una transición más rápida y confiable del laboratorio a la planta industrial (Jin et al , 2018; Conde-Báez et al , 2019).

El objetivo de este trabajo fue simular y validar el proceso de separación para 2-FE a partir del caldo de fermentación con lactosuero dulce de Puga-Córdova et al (2020), utilizando el simulador Unisim Design R500. El proceso incluye una etapa de extracción líquido-líquido con acetato de etilo como solvente, seguida de dos columnas de destilación para la purificación del 2-FE y la recuperación del solvente.

2. METODOLOGIA

El diseño del proceso de separación se desarrolló siguiendo la metodología reportada por Puga-Córdova et al (2020) como se observa en la 1, adaptándola al entorno de simulación UniSim Design R500 (estado no dinamico). Para asegurar la comparabilidad de los resultados, se conservaron los mismos flujos másicos y composiciones de las corrientes reportadas en la literatura. Esta estrategia de modelado basada en referencias prevalidadas constituye una práctica establecida para garantizar la confiabilidad de las simulaci-ones de procesos.

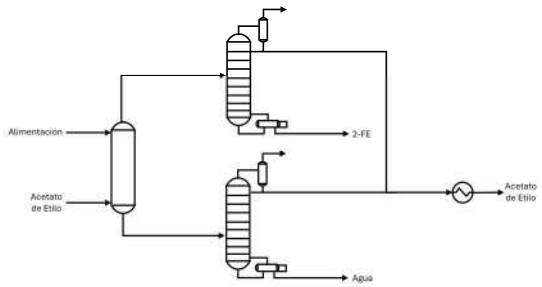


Figura 1:. Diagrama del proceso de separación.

La composición de la corriente de salida del fermentador se fundamenta en datos experimentales específicos de fermentación de lactosuero dulce con *Kluyveromyces marxianus*, reportados por Conde-Báez et al (2019). La mezcla resultante contiene 0.08% en peso de 2-FE, 2.27% en peso de bioetanol y agua como componente mayoritario, con un flujo másico de alimentación de 2908.9 kg/h a 30°C y 1 atm, según las condiciones establecidas por Puga-Córdova et al (2020).

Considerando la alta dilución del 2-FE en fase acuosa, se seleccionó una configuración de extracción líquido-líquido como etapa inicial de separación, seguida de dos columnas de destilación para la purificación final del compuesto objetivo y la recuperación del solvente. Este enfoque se alinea con los principios de biorrefinería que promueven la valorización integral de residuos agroindustriales (Ubando et al , 2020).

La selección del acetato de etilo como solvente de extracción se justifica por su alta selectividad hacia el 2-FE, su bajo costo relativo en mercados mexicanos de aproximadamente USD 1.50/kg, y su compatibilidad con aplicaciones en productos naturales. Adicionalmente, este solvente evita la introducción de contaminantes petroquímicos, siendo reconocido como seguro para su uso en alimentación (Eshkol et al , 2009).

La secuencia de separación propuesta integra tres unidades principales interconectadas. La primera unidad presentada en la Tabla 1 corresponde a una columna de extracción líquido-líquido,donde la corriente fermentada se pone en contacto en contracorriente con acetato de etilo. La relación solvente/alimentación se ajusta para alcanzar un flujo total de solvente de 1065.6 kg/h, considerando la recirculación. Esta columna, diseñada con 35 etapas teóricas y operando a 30°C y 1 atm, logra una remoción del 99.90% del 2-FE, minimizando simultáneamente la co-extracción de agua a menos del 5% en masa y la de bioetanol.

El análisis termodinámico del proceso de separación se fundamentó en la selección del modelo UNIQUAC para la representación de equilibrios en el sistema cuaternario agua-etanol-acetato de etilo-2-FE. Esta elección se justificó por la capacidad del modelo para capturar desviaciones significativas del comportamiento ideal, particulamente en mezclas que presentan equilibrios líquido-líquido y vapor-

líquido de sistemas no ideales, donde existen interacciones especí-ficas entre componentes polares y no polares.

El análisis de los parámetros de interacción binaria resultantes revela interacciones significativas entre los componentes, particularmente los valores elevados para los pares agua-acetato de etilo (757.6 cal/mol) y 2-FE-agua (474.7 cal/mol), que explican la fuerte no idealidad del sistema y justifican la necesidad de un modelo termodinámico avanzado para representar adecuadamente los equilibrios de fases en el proceso de separación.

Tabla 1. Columna de extracción líquido-líquido T-100.

Corriente	Entrada (1)	Solvente (2)	Extracto (3)	Refinado (7)
Fracción de vapor	0	0	0	0
Temperatura [°C]	30	30	30	30
Presión [atm]	1	1	1	1
Flujo másico [kg/h]	2908.9	1065.6	759.85	3214.65
Fracción másica				
Agua	0.9811	0.0535	0.0437	0.8952
2-FE	0.0008	0.0000	0.0030	0.0000
Bioetanol	0.0181	0.0080	0.0134	0.0159
Acetato de etilo	0.0000	0.9385	0.9399	0.0889

La segunda unidad (Tabla 2) es una columna de destilación para la purificación del 2-FE. El extracto orgánico rico en 2-FE y acetato de etilo, con un flujo de 759.48 kg/h, se alimenta tras un bombeo a 1.5 atm. Esta columna opera a presión atmosférica con 8 etapas teóricas y una relación de reflujo de 1.08.

Tabla 2. Columna de destilación: purificación de 2-FE T-101.

Corriente	Entrada (4)	Destilado (5)	Fondo (6)
Fracción de vapor	0	9.77E-05	0
Temperatura [°C]	29.78	71.30	156.39
Presión [atm]	1.5	1	1.5
Flujo másico [kg/h]	759.49	756.83	2.66
Fracción másica			
Agua	0.0431	0.0433	0.000286
2-FE	0.00306	5.08E-18	0.87498
Bioetanol	0.0133	0.0134	0.000198
Acetato de etilo	0.94047	0.94333	0.12454

La tercera unidad (Tabla 3) comprende una columna de destilación para la recuperación del solvente. La corriente acuosa con trazas de acetato de etilo, de 3215 kg/h, se procesa después de un bombeo a 1.5 atm. Con 19 etapas teóricas y una relación de reflujo de 4.80. Finalmente, las corrientes de solvente recuperado se enfrían y mezclan con una corriente de solvente fresco de 11.6 kg/h para cerrar el ciclo del proceso y garantizar el el balance de materia.

La integración térmica se mantuvo idéntica, con un intercambiador para ajustar la temperatura del solvente recirculado a 30°C (Puga-Córdova et al., 2020). El bioetanol se recupera como subproducto en el destilado de la primera columna de destilación, pero es recirculado para recuperar el solvente.

Tabla 3. Columna de destilación: Recuperación del solvente T-102.

Corriente	Entra (8)	Destilado (9)	Fondos (10)
Fracción de vapor	0	4.83E-06	0
Temperatura [°C]	29.94	70.79	111.77
Presión [atm]	1.5	1	1.5
Flujo másico [kg/h]	3215.01	378.96	2836.05
Fracción másica			
Agua	0.89523	0.11118	1.00000
2-FE	5.14E-30	1.30E-29	4.09E-30
Bioetanol	0.01590	0.13468	2.43E-10
Acetato de etilo	0.08890	0.75414	2.94E-23

2.1 Modelado Termodinámico

Para la simulación del proceso de separación de 2-FE a partir del caldo de fermentación, se seleccionó el modelo termodinámico UNIQUAC (Universal Quasichemical) por su capacidad para representar adecuadamente las desviaciones del comportamiento ideal en sistemas multicomponentes que presentan equilibrios líquido-líquido y vapor-líquido de sistemas no ideales. Las ecuaciones que representan el modelo UNIQUAC:

La energía de Gibbs en exceso según el modelo UNIQUAC está dada por:

$$g^E = g^E_{\text{combinatorial}} + g^E_{\text{residual}} \tag{1}$$

donde el término combinatorio considera las diferencias en tamaño y forma de las moléculas, mientras que el término residual considera las interacciones energéticas entre los componentes.

Término Combinatorial

$$\frac{g^E_{\text{combinatorial}}}{RT} = \sum_{i=1}^{N} x_i \ln \frac{\phi_i}{x_i} + \frac{Z}{2} \sum_{i=1}^{N} q_i x_i \ln \frac{\theta_i}{\phi_i} \tag{2}$$

donde:

- x_i: fracción molar del componente i
- ϕ_i: fracción de segmento $\phi_i = \dfrac{r_i x_i}{\sum_j r_j x_j}$
- θ_i: fracción de área $\theta_i = \dfrac{q_i x_i}{\sum_j q_j x_j}$
- r_i: parámetro de volumen molecular
- q_i: parámetro de área superficial molecular
- Z: número de coordinación (usualmente $Z = 10$)

Término Residual

$$\frac{g^E_{\text{residual}}}{RT} = -\sum_{i=1}^{N} q_i x_i \ln \left(\sum_{j=1}^{N} \theta_j \tau_{ji} \right) \tag{3}$$

donde:

- τ_{ji}: parámetro de interacción binaria $\tau_{ji} = \exp\left(-\dfrac{a_{ji}}{T}\right)$
- a_{ji}: parámetro de energía de interacción entre los componentes j e i

Coeficiente de Actividad El coeficiente de actividad para cada componente se obtiene como:

$$\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^{\text{combinatorial}} + \ln \gamma_i^{\text{residual}} \quad (4)$$

donde:

$$\ln \gamma_i^{\text{combinatorial}} = \ln \frac{\phi_i}{x_i} + \frac{Z}{2} q_i \ln \frac{\theta_i}{\phi_i} + l_i - \frac{\phi_i}{x_i} \sum_{j=1}^{N} x_j l_j \quad (5)$$

con $l_i = \frac{Z}{2}(r_i - q_i) - (r_i - 1)$, y

$$\ln \gamma_i^{\text{residual}} = q_i \left[1 - \ln \left(\sum_{j=1}^{N} \theta_j \tau_{ji} \right) - \sum_{j=1}^{N} \frac{\theta_j \tau_{ij}}{\sum_{k=1}^{N} \theta_k \tau_{kj}} \right] \quad (6)$$

2.2 Simulación del Proceso

El modelo de simulación se implementó en el software UniSim Design R500 (Honeywell), un simulador en la industria de procesos químicos por su robustez en el modelado de sistemas multicomponentes complejos. Para la representación termodinámica del sistema cuaternario agua-etanol-acetato de etilo-2-feniletanol, se seleccionó el modelo UNIQUAC (Universal Quasichemical) (Anderson and Prausnitz et al , 1978; Saien et al , 2020; Zhao et al , 2022; Zhong et al , 2023) debido a su capacidad predictiva superior en mezclas que presentan desviaciones significativas del comportamiento ideal, en sistemas que involucran compuestos polares y no polares donde existen interacciones específicas moleculares.

Tabla 4. Parámetros de interacción binaria Aij del modelo UNIQUAC.

	H_2O	**2-FE**	**Etanol**	**Acetato de etilo**
H_2O	—	123.2	50.88	757.6
2-FE	474.7	—	-91.93	117.3
Etanol	232.0	289.3	—	364.0
Acetato de etilo	151.6	-47.82	-62.70	—

Cabe destacar que el simulador calculó los parámetros de interacción (Tabla 4) ante la falta de datos experimentales de equilibrio específicos en la literatura.

UniSim Design realizó esta estimación mediante una metodología híbrida: inicialmente utilizando el método de contribución de grupos UNIFAC para generar valores preliminares basados en la estructura molecular, y posteriormente aplicando algoritmos de regresión no lineal para optimizar los parámetros UNIQUAC, tomando como referencia el compor-tamiento termodinámico de sistemas análogos disponibles en su base de datos integrada.

La corriente de alimentación principal (corriente 1) se configuró con un flujo másico de 2908.9 kg/h, replicando exactamente las condiciones operativas reportadas por Puga-Córdova et al (2020). Esta configuración incluyó no solo la composición exacta de la mezcla, sino también las condiciones termodinámicas de temperatura (30°C) y presión (1 atm), manteniendo la coherencia con los datos experimentales de referencia. Las composiciones de todas las corrientes intermedias se establecieron según los valores tabulados en la literatura de consulta, garantizando la trazabilidad del modelo de simulación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 presenta el diagrama de flujo del proceso de separación simulado en UniSim Design R500. El proceso integra tres operaciones unitarias principales: extracción líquido-líquido (T-100) y dos columnas de destilación (T-101 y T-102).

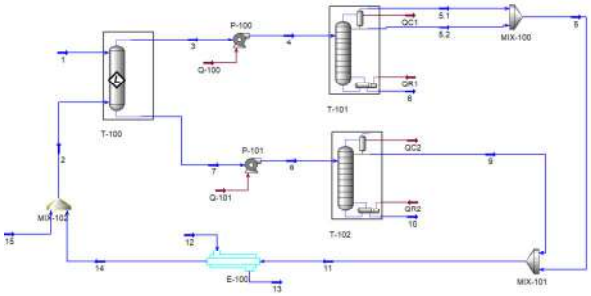


Figura 2:. Diagrama del proceso de separación en UniSim Design.

La corriente de alimentación (1) proveniente del fermentador se mezcla con el solvente de acetato de etilo en la columna de extracción, generando dos corrientes: el extracto (3) rico en 2-FE y solvente, y el refinado (7) con trazas de solvente.

El extracto se procesa en la columna T-101 para purificar el 2-FE, mientras que el refinado se trata en T-102 para recuperar el solvente residual. Las corrientes de solvente recuperado se recirculan mediante bombas (P-100, P-101) e intercambiadores de calor (Q-101), completando un ciclo cerrado que minimiza el consumo de solvente fresco.

3.1 Recuperación de 2-FE en el proceso

El proceso de separación demostró una eficiencia notable en la recuperación de 2-FE desde la corriente de fermentación inicialmente diluida. En la etapa de extracción líquido-líquido (T-100), se logró una remoción del 99.90% del 2-FE presente en la alimentación, concentrán-dolo en la corriente de extracto orgánico. Esta alta eficiencia de extracción confirma la selectividad del acetato de etilo como solvente para el compuesto objetivo.

Posteriormente, en la columna de destilación T-101 dedicada a la purificación del 2-FE, se obtuvo el producto final con una pureza del 87.49% en peso en la corriente de fondos. Si bien este valor representa una recuperación efectiva, la presencia de acetato de etilo residual (12.45%) en el producto sugiere limitaciones en la separación completa, posiblemente asociadas a las interacciones termodinámicas en el sistema multicomponente.

El flujo másico de 2-FE en la corriente de producto (6) alcanzó 2.32 kg/h, lo que corresponde a una recuperación global satisfactoria considerando la baja concentración inicial en el caldo de fermentación (0.08% en peso). La mínima presencia de 2-FE en las demás corrientes del proceso, particularmente en el refinado de la extracción y en el destilado de la columna T-101 (valores inferiores a

10E-17), confirma la efectividad del esquema de separación propuesto para la concentración y purificación de este compuesto de alto valor agregado.

3.2 Perfiles de temperatura y composición en la columna de extracción T-100

El análisis de los perfiles internos de la columna de extracción líquido-líquido T-100 proporciona información valiosa sobre el comportamiento del sistema. La Figura 3 muestra el perfil de temperatura a lo largo de las etapas de la columna, donde se observa una variación mínima de aproximadamente 29.70°C a 30.15°C, confirmando que la operación se mantiene esencialmente isotérmica alrededor de 30°C, tal como fue diseñada para preservar la estabilidad termodinámica del sistema. En la columna de extracción T-100, se observa un cambio pequeño en la composición del 2-FE entre las etapas 30 a 35. Específicamente, la fracción másica del 2-FE en la fase acuosa disminuye, demostrando la transferencia eficiente hacia la fase orgánica.La alta selectividad del acetato de etilo por el 2-FE, combinada con las 35 etapas teóricas en contracorriente, asegura una extracción prácticamente completa (99.90%).

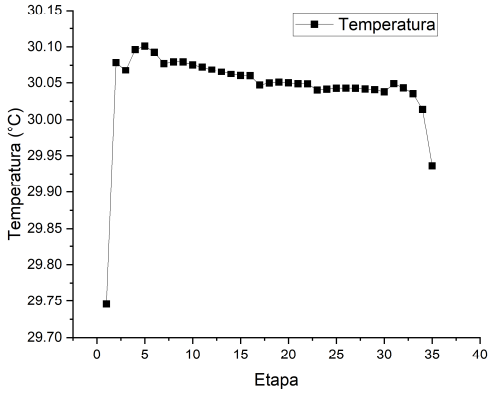


Figura 3:. Perfil de temperatura en la columna de extracción T-100.

La Figura 4 presenta los perfiles de composición para los cuatro componentes principales a través de las etapas de la columna. El perfil del agua muestra una concentración constante mientras que el 2-FE presenta una disminución significativa hasta valores cercanos a cero, evidenciando su eficiente transferencia hacia la fase del solvente. El bioetanol mantiene una concentración estable y el acetato de etilo, como solvente principal, presenta una concentración dominante, confirmando su papel como medio extractante efectivo.

Estos perfiles validan el diseño de 35 etapas teóricas de la columna de extracción, mostrando que la transferencia de masa del 2-FE hacia la fase orgánica se completa satisfactoriamente dentro del número de etapas, con una distribución estable de los demás componentes que minimiza las pérdidas de solvente y la co-extracción de agua.

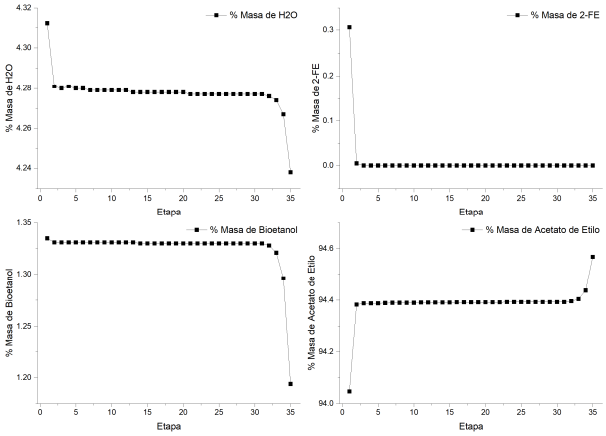


Figura 4:. Perfiles de composición en la columna de extracción T-100.

3.3 Perfiles de temperatura y composición en la columna de destilación T-101

El análisis de los perfiles internos de la columna de destilación T-101, diseñada específicamente para la purificación del 2-FE, revela el comportamiento característico de esta operación de separación. La Figura 5 muestra el perfil de temperatura a lo largo de las 8 etapas teóricas de la columna, donde se observa un gradiente térmico significativo que aumenta progresivamente desde aproximadamente 70°C en las etapas superiores hasta alcanzar los 85°C en el fondo de la columna. Este perfil confirma el enriquecimiento térmico hacia las etapas inferiores, asociado a la concentración de los componentes de mayor punto de ebullición.

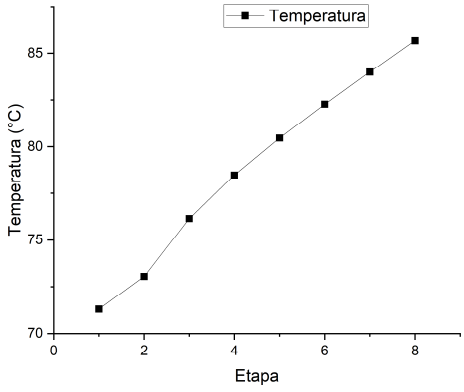


Figura 5:. Perfil de temperatura en la columna de destilación T-101.

La Figura 6 presenta los perfiles de composición detallados para los cuatro componentes principales. El 2-FE muestra una concentración mínima en las etapas superiores y un marcado incremento hacia las etapas inferiores, alcanzando su máxima pureza en el fondo de la columna. El acetato de

etilo presenta el comportamiento inverso, dominando las etapas superiores y disminuyendo progresivamente hacia el fondo. El agua muestra una distribución relativamente uniforme con ligera predominancia en etapas intermedias, mientras que el bioetanol se concentra principalmente en las etapas centrales de la columna.

En la columna T-101, el perfil de composición muestra un cambio abrupto en las etapas 6 a 8, donde la fracción másica del 2-FE experimenta un incremento significativo. Este comportamiento se atribuye a la baja volatilidad relativa del 2-FE comparado con el acetato de etilo y bioetanol. A medida que aumenta la temperatura hacia el fondo de la columna (desde 71.30°C hasta 85°C), el 2-FE -con menor presión de vapor- se concentra progresivamente en la fase líquida, mientras los componentes más volátiles ascienden hacia el destilado.

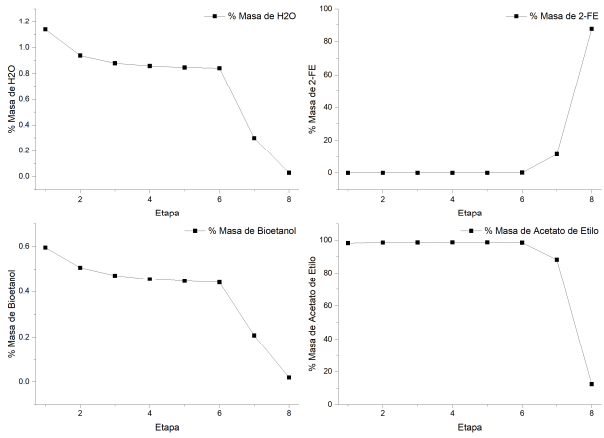


Figura 6:. Perfiles de composición en la columna de destilación T-101.

Estos perfiles termodinámicos validan el diseño operativo de la columna T-101 con 8 etapas teóricas y una relación de reflujo de 1.08, demostrando su efectividad para separar selectivamente el 2-FE de los demás componentes y lograr el producto final con una pureza del 87.49% en la corriente de fondos, cumpliendo con los objetivos de purificación establecidos para este compuesto de alto valor agregado.

3.4 Perfiles de temperatura y composición en la columna de destilación T-102

El análisis de los perfiles internos de la columna de destilación T-102, diseñada para la recuperación del solvente, revela el comportamiento característico de esta operación de separación. La Figura 7 muestra el perfil de temperatura a lo largo de las 19 etapas teóricas de la columna, donde se observa un gradiente térmico que varía desde aproximadamente 70°C en las etapas superiores hasta 111°C en el fondo de la columna. Este perfil confirma la separación efectiva entre los componentes volátiles y el agua como producto de fondos. En la columna de recuperación de solvente T-102, se identifica un cambio marcado entre las etapas 15 a 19 para la composición del acetato de etilo:

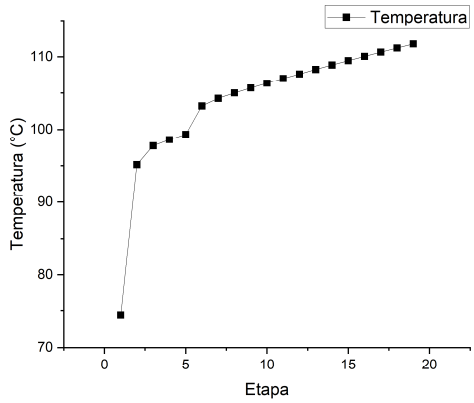


Figura 7:. Perfil de temperatura en la columna de destilación T-102.

La Figura 8 presenta los perfiles de composición detallados para los cuatro componentes principales. El acetato de etilo muestra una concentración predominante en las etapas superiores, lo que confirma la eficiencia en la recuperación del solvente. El agua, por su parte, se enriquece progresivamente hacia las etapas inferiores, alcanzando una pureza del 100% en los fondos. El bioetanol presenta una distribución que favorece su concentración en el destilado, con una fracción másica de 0.135, mientras que el 2-FE muestra concentraciones insignificantes en toda la columna (inferiores a 10E-29), confirmando su remoción casi completa en etapas previas del proceso.

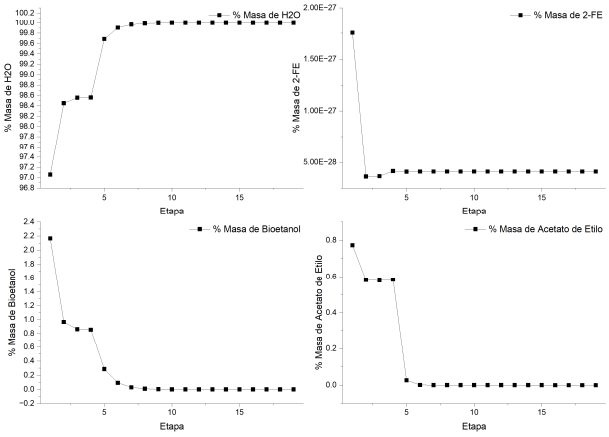


Figura 8:. Perfiles de composición en la columna de destilación T-102.

Estos perfiles termodinámicos validan el diseño operativo de la columna T-102 con 19 etapas teóricas y una relación de reflujo de 4.80, demostrando su efectividad para recuperar el 75% del acetato de etilo en el destilado con una pureza del 75.43%, mientras que en los fondos se obtiene agua con pureza prácticamente total, cumpliendo con los objetivos de recuperación y reutilización del solvente en el proceso.

3.5 Consumo energético del proceso

El consumo energético del proceso de separación, reportado en la Tabla 5, arroja un requerimiento total de 5210.3 kW según los resultados del simulador. Los equipos que presentan mayor demanda energética son la columna de extracción líquido-líquido T-100 (1771 kW) y el intercambiador de calor E-100 (1929 kW), que en conjunto representan aproximadamente el 71% del consumo total.

En las operaciones de destilación, los rehervidores de las columnas T-101 y T-102 reportan demandas de 221.7 kW y 683.6 kW respectivamente, mientras que sus condensadores requieren 202.9 kW y 402 kW, de acuerdo con la simulación. Este perfil de consumo indica que las etapas de separación por destilación constituyen los segmentos más intensivos en energía del proceso, particularmente la columna T-102 cuya finalidad es la recuperación del solvente.

Las bombas P-100 y P-101 presentan consumos pequeños (0.016 kW y 0.0604 kW respectivamente), lo que señala que el principal desafío para la optimización energética del proceso se concentra en las operaciones de transferencia de calor y separación, más que en el bombeo de fluidos.

Tabla 5. Consumo energético del proceso de separación.

Equipo	Energía (kW)
Columna de extracción líquido-líquido T-100	1771
Bomba P-100	0.016
Columna T-101	
Condensador	202.9
Rehervidor	221.7
Bomba P-101	0.0604
Columna T-102	
Condensador	402
Rehervidor	683.6
Intercambiador de calor E-100	1929
Total	5210.3

3.6 Evaluación del Desempeño del Proceso

La evaluación del desempeño del proceso de separación simulada en UniSim Design R500 revela aspectos técnicos significativos. El modelo termodinámico implementado demostró capacidad predictiva adecuada para el sistema multicomponente, a pesar de la limitante inicial de carecer de datos experimentales de equilibrio específicos para los pares binarios que involucran al 2-FE.

La estrategia computacional empleada por el simulador, combinando el método UNIFAC para la estimación inicial con algoritmos de regresión no lineal para el ajuste fino de los parámetros UNIQUAC (Tabla 1), permitió generar predicciones consistentes con el comportamiento fisicoquímico observado en sistemas análogos validados experimentalmente.

En cuanto a los resultados de separación, el proceso logró obtener 2-FE con una pureza del 87.4% en peso en la corriente de fondos de la columna T-101. Si bien este valor representa una recuperación efectiva del compuesto desde la mezcla de fermentación inicialmente muy diluida (0.08% en peso), la pureza alcanzada evidencia limitaciones en la separación completa del acetato de etilo, el cual permanece en una proporción del 12.45% en el producto final.

Este comportamiento puede atribuirse a las complejas interacciones termodinámicas en la mezcla cuaternaria, particularmente a la adecuación de los parámetros de interacción binaria estimados para los pares que involucran al 2-FE. El desempeño global del proceso confirma la viabilidad técnico-conceptual del esquema de separación propuesto, aunque sugiere áreas de oportunidad para optimización futura, particularmente en el refinamiento de los parámetros termodinámicos mediante datos experimentales específicos y en el ajuste de condiciones operativas de las columnas de destilación.

3.7 Implicaciones para la Biorrefinería

El proceso de separación de 2-FE implementado presenta implicaciones significativas para el concepto de biorrefinería. La integración de la fermentación de lactosuero dulce (un residuo agroindustrial de alta carga contaminante) con operaciones de separación eficientes permite transformar un desecho ambiental en un compuesto de alto valor comercial. Este enfoque se alinea con los principios de economía circular, donde los flujos residuales se reincorporan a las cadenas productivas.

La recuperación del 94% de acetato de etilo en la columna T-101 y la separación concurrente de bioetanol como subproducto mejoran notablemente la sostenibilidad económica del proceso. La configuración simulada demuestra la viabilidad técnica para implementar biorrefinerías de pequeña escala en regiones con alta producción quesera, como Tlaxcala, ofreciendo una alternativa de valorización que combate la contaminación y genera ingresos adicionales para la industria láctea local.

La metodología empleada, utilizando herramientas de simulación para el diseño de procesos basados en residuos, establece un precedente para el desarrollo de biorrefinerias adaptadas a contextos regionales específicos, maximizando el aprovechamiento de recursos subutilizados y minimizando la dependencia de materias primas convencionales.

3.8 Perspectivas de Escalamiento

Los resultados de simulación proporcionan una base sólida para el diseño de plantas a mayor escala, particularmente en el contexto de biorrefinerías regionales en zonas con alta producción de lactosuero.La integración energética del proceso, especialmente en las columnas de destilación T-101 y T-103, representa un aspecto crítico para la viabilidad económica del escalamiento.

El consumo energético estimado y los requerimientos de servicios auxiliares indican la necesidad de optimización adicional en términos de integración térmica. La recirculación eficiente del acetato de etilo, con una tasa de recuperación del 75%, constituye un factor clave para la sostenibilidad económica del proceso a escala industrial.

La configuración propuesta permite un escalamiento modular, facilitando implementaciones progresivas acordes a la disponibilidad regional de lactosuero. El desafío principal identificado incluyen el manejo de corrientes diluidas, lo

que sugiere la conveniencia de estudios piloto intermedios antes de la implementación a escala industrial completa.

Cabe destacar que, según lo reportado en la literatura (Chacón-Izquierdo et al , 2022), existen alternativas de solventes para el proceso de extracción que podrían ofrecer ventajas en términos de seguridad inherente. Entre estos se encuentran el ácido oleico y el glicol de propileno, los cuales presentan puntos de inflamación significativamente más altos (189°C y 104°C respectivamente) en comparación con el acetato de etilo (-4°C), reduciendo así el riesgo de incendio. Particularmente, el ácido oleico muestra un valor de DL50 de 74.0 g kg^{-1}, indicando una toxicidad considerablemente menor. La selección del solvente óptimo debe balancear no solo la eficiencia de extracción sino también criterios de seguridad y sostenibilidad.

La selección del solvente óptimo debe balancear no solo la eficiencia de extracción y consideraciones económicas, sino también criterios de seguridad inherente y sostenibilidad. Aunque el acetato de etilo demostró efectividad técnica en este estudio, la integración de principios de seguridad inherente en etapas tempranas del diseño podría conducir a procesos más robustos y sostenibles, particularmente importante en el contexto de biorrefinerías que buscan alinear la producción de compuestos naturales con los más altos estándares de seguridad y protección ambiental.

4. CONCLUSIONES

El diseño y simulación del proceso de separación de 2-feniletanol a partir de lactosuero fermentado, implementado en UniSim Design R500, demuestra la viabilidad técnica de un esquema integrado de biorrefinería para la valorización de residuos agroindustriales. La secuencia de operaciones unitarias (extracción líquido-líquido seguida de dos columnas de destilación) permitió recuperar el 2-FE con una pureza del 87.49% a partir de una corriente de alimentación extremadamente diluida (0.08% en peso), validando la efectividad del acetato de etilo como solvente de extracción.

La metodología termodinámica implementada, basada en el modelo UNIQUAC con parámetros de interacción binaria estimados mediante UNIFAC y regresión no lineal para los pares con el 2-FE dados por el simulador, proporcionó predicciones consistentes a pesar de la limitante inicial de carecer de datos experimentales específicos. El proceso logró además una eficiente recuperación y recirculación del solvente (88%), mejorando su sostenibilidad económica y ambiental.

Este trabajo establece las bases para el escalamiento de biorrefinerías modulares en regiones con alta producción de lactosuero, como Tlaxcala, ofreciendo una alternativa concreta de economía circular. Como perspectivas futuras, se recomienda la validación experimental de los parámetros termodinámicos estimados para incrementar su competitividad industrial.

Como trabajo futuro, se recomienda realizar un análisis técnico-económico detallado que considere los costos de inversión y operación, así como estudios de integración energética para optimizar aún más el consumo. Adicional, la validación experimental del proceso a escala piloto permitiría confirmar los resultados de la simulación y ajustar los parámetros operativos para condiciones reales de producción.

REFERENCES

Alonso-Vargas, M., González, A., Rodríguez, L. ,Martínez, C. (2022). Production of 2-phenylethanol by *Kluyveromyces marxianus*. *Biotechnology Reports*, 33, e00698.

Anderson, T.F. , Prausnitz, J.M. (1978). Application of the UNIQUAC Equation to Calculation of Multicomponent Phase Equilibria. 2. Liquid-Liquid Equilibria. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 17(4), 561–567. https://doi.org/10.1021/i260068a029

Chacón-Izquierdo, A., García, M. y Hernández, K. (2022). Design of a Separation Process for Natural 2-phenylethanol with Solvent Selection Based on Safety Criteria. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 97(8), 2103–2108. https://doi.org/10.1002/jctb.7081

Conde-Báez, L., Castro, F., Díaz, G. (2017a). 2-Phenylethanol production from whey. *Journal of Biotechnology*, 256, S34.

Conde-Báez, L., Castro, F., Díaz, G. (2017b). Simultaneous production of 2-phenylethanol and bioethanol. *Biochemical Engineering Journal*, 127, 1–9.

Conde-Báez, L., Castro, F., Díaz, G. (2019). Cheese whey as substrate for 2-phenylethanol. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(15), 6213–6222.

Conde-Báez, L., Castro, F. , Díaz, G. (2024). Bioethanol from whey fermentation. *Renewable Energy*, 215, 119012.

Eshkol, N., Sendovski, M. , Bahalul, M. (2009). Microbial production of 2-phenylethanol. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(10), 4021–4026.

Etschmann, M.M.W., Bluemke, W. , Sell, D. (2002). Production of 2-phenylethanol. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 59(1), 1–8.

Jin, J.Z., Zhang, Y. y Li, Y. (2018). Advances in 2-phenylethanol biosynthesis. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 6, 149.

Lu, K.T., Sung, J., Lee, K.J., Park, Y.D. , Kim, S.K. (2002). Conformation-dependent ionization energies of l-phenylalanine. *Angewandte Chemie International Edition*, 41(21), 4114–4117. https://doi.org/10.1002/1521-3773(20021104)41:21¡4114::AID-ANIE4114¿3.0.CO;2-M

Morales-Taneco, L.S., Fernández-Martínez, E.H. (2025). Kinetic modeling for the sustainable synthesis of 2-phenylethanol and bioethanol from whey. *IFAC-PapersOnLine*, (en prensa).

Prazeres, A.R., Carvalho, F. , Rivas, J. (2012). Cheese whey management. *Bioresource Technology*, 120, 2–12.

Puga-Córdova, L.E., Conde-Báez, H.(2020). Design of a Separation Process for Natural 2-Phenylethanol with Economic and Safety Considerations. *Processes*, 8(12), 1570. https://doi.org/10.3390/pr8121570

Saien, J., Asadabadi, S. , Bayat, M. (2020). Temperature and Salt Effects on the Liquid–Liquid Equilibrium of the Water + Cyclopentanone + (Propan-2-Yl) Benzene System. *Journal of*

Chemical & Engineering Data, 65(11), 5505–5515. https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00622

Stark, D., Zala, D. , Münch, T. (2002). Extractive bioconversion of 2-phenylethanol. *Biotechnology Progress*, 18(3), 514–523.

Ubando, A.T., Felix, C.B. , Chen, W.H. (2020). Biorefineries for waste valorization. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122346.

Wandega, B.O., Kamau, G.N. , Mwangi, S.W. (2020). Circular economy in biorefineries. *Sustainability*, 12(16), 6626.

Zhao, H., Li, X., Wang, J. , Zhang, L. (2022). Vapor–Liquid Equilibrium for the Binary System of 2-Phenylethanol + 2-Ethylphenol at 50.0, 20.0, and 10.5 kPa. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 67(10), 3108–3115. https://doi.org/10.1021/acs.jced.2c00361

Zhong, J.-X., Chen, Y., Li, M., Wang, H. , Liu, Z. (2023). Ternary Liquid–Liquid Equilibria for 2-Phenylethyl Acetate + 2-Phenylethanol + Water and 2-Phenylethyl Acetate + Acetic Acid + Water at Atmospheric Pressure. *Results in Chemistry*, 5, 100744. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100744

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Implications of Slaughterhouse Wastewater: A Socio-environmental Perspective

Maria Eva Juárez-Ortuño*; Aarón Montiel-Rosales*; Nayeli Montalvo-Romero†; Oscar Ruiz-Hernández*; Jorge Rivera-Flores***

**Tecnológico Nacional de México / ITS de Teziutlán, Fracción l y ll SN 73960 Teziutlán México (e-mail: M23TE0062@teziutlan.tecnm.mx; ar.chimedes@hotmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3064-0274; oscar.rh@teziutlan.tecnm.mx; jorge.rf@teziutlan.tecnm.mx)*

***Tecnológico Nacional de México / ITS de Misantla, Km 1.8 Carretera Lomas del Cojolite 93828 Misantla México (e-mail: naiemontalvor@gmail.com), [ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3706-6244]*

† Corresponsal: naiemontalvor@gmail.com

Abstract: The wastewater generated from the animal slaughter process generates significant socio-environmental implications, as it is not managed properly. In this study, the perceptions of a community member near a municipal slaughterhouse and the workers of said slaughterhouse were identified. The data collected from the perceptions of workers and neighbors show that the operation of the slaughterhouse is generating tangible and persistent negative impacts on the environment and the quality of life of the community (evidenced by the high perception of odors, noise, dirty water and health problems), which validates the relevance of the proposals for integrated management strategies to transform its operation towards a more sustainable and responsible model. The results of this study show the need to implement integrated management strategies in wastewater discharge, solid and hazardous waste management, and odor and noise control to safeguard local well-being and environmental sustainability.

Keywords: wastewater, slaughterhouses, environment, society, health.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital y es el eje central de las operaciones en cualquier rastro. Sin embargo, su uso intensivo e ineficiente en este tipo de instalaciones, sumado a la descarga inadecuada de sus efluentes, representa una fuente significativa de preocupación socioambiental. Estos efluentes, con carga de materia orgánica, grasas, nutrientes y patógenos, tienen el potencial de sobrecargar y degradar los ecosistemas acuáticos (Nauman et al., 2023; Ng et al., 2022; Sohil & Kichloo, 2023). Al ser vertidos sin el tratamiento adecuado, provocan la eutrofización de cuerpos de agua, agotan el oxígeno esencial para la vida acuática y alteran drásticamente los hábitats fluviales, afectando la biodiversidad y la calidad del recurso hídrico para usos posteriores (Bulu & Oladoja, 2025).

La contribución económica de la ganadería es una importante fuente de ingresos y empleo para muchas personas a nivel mundial. Ya que también proporciona carne, leche, huevos y otros productos animales que son básicos para la alimentación humana. Además, la ganadería está relacionada con otras industrias como la producción de alimentos para animales, el procesamiento de carnes y la fabricación de productos de cuero. En cuanto al impacto ambiental, la ganadería es responsable de una parte significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero, que contribuyen al cambio climático (Papakonstantinou et al., 2024). Se estima que el sector ganadero es responsable de alrededor del 25% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero, lo que lo convierte en uno de los principales contribuyentes al calentamiento global (Cheng et al., 2022).

Además, la ganadería requiere grandes cantidades de tierra para pastoreo y producción de alimentos para animales, lo que puede llevar a la deforestación y la pérdida de biodiversidad. También puede contribuir a la contaminación del agua y del suelo debido al uso de fertilizantes y pesticidas, así como a la gestión inadecuada de los desechos animales. El alto consumo de agua se da en las operaciones de los mataderos que requieren obligatoriamente volúmenes considerables de agua para el sacrificio, procesamiento, limpieza y sanitización de los animales y las instalaciones (Shende et al., 2022). Se estima que el uso de este recurso puede variar significativamente, oscilando entre 5,000 a 1,500 L de agua por animal (Bailone et al., 2021), una variabilidad que depende en gran medida del tipo de animal y de la eficiencia operativa de cada una de las instalaciones. Esta demanda hídrica, si no se gestiona de forma óptima y responsable, se traduce en un desperdicio innecesario de un recurso limitado.

Se dice que las aguas residuales procedentes de los rastros municipales son un problema latente en este mundo actual dado que sus características de dichos efluentes se han reconocido como una de las aguas más agresivas que se arrojan al medio ambiente

Las aguas residuales de los rastros se caracterizan por elevadas concentraciones de Materia Orgánica (MO), Demanda Biológica de Oxigeno (DBO), Demanda Química de Oxigeno

(DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), grasas, aceites, fósforo, NH_4-H, Nitrógeno Total (NT), Carbono Orgánico Total (COT), Fósforo Total (FT), Sulfuro Total (ST) y el pH excede el límite estándar permitido por el Banco Mundial para efluentes de aguas residuales; además presenta patógenos como *Escherichia coli* o *Salmonella spp*. Los valores típicos de DQO es de 830 mg/L, DQO soluble de 615 mg/L, y pH de 6.9 (Gadipelly et al., 2014).

Las descargas de estas aguas residuales generan un gran impacto a los efluentes receptores ya sean aguas tratadas o no, nuestros ríos, lagos, arroyos y suelos son dañados generándoles problemáticas como la eutrofización, disminución del oxígeno disuelto, toxicidad para la vida acuática, alteración de ecosistemas y riesgos para la salud de los humanos debido a la dispersión de varios patógenos.

Otro síntoma desagradable de la operación de rastros es la emisión de olores irritantes, ya que estos son resultado de la descomposición de la materia orgánica y la presencia de componentes como el sulfuro de hidrógeno en las aguas residuales sin tratar o en los residuos sólidos acumulados. Estos olores afectan directamente la calidad del aire y, lógicamente, a la calidad de vida de las comunidades colindantes.

Los desechos de un rastro, tanto sólidos como líquidos, se pueden convertir de un problema de disposición en un área de oportunidad que permite la sostenibilidad.

La situación del rastro municipal, al operar bajo la categoría de Tipo Secretaría de Salud (TSS), presenta un panorama particular. A diferencia de los rastros Tipo Inspección Federal (TIF) con regulaciones más estrictas, este tipo de instalaciones a menudo exhibe una regulación y un cumplimiento normativo parcial en cuanto a la legislación federal, estatal y municipal vigente. Esto se observa no solo en sus protocolos de higiene y sacrificio, sino, y de manera más crítica, en la gestión de sus aguas residuales y la generación de residuos biológico-infecciosos. Esta realidad, lamentablemente, no es exclusiva de este rastro, sino que es compartida por muchos rastros municipales en México.

Más allá del agua, el desafío se extiende a la gestión inadecuada de los residuos sólidos generados, como vísceras, huesos y pieles. Estos desechos no solo representan una oportunidad perdida para generar valor (mediante su aprovechamiento o reciclaje), sino que constituyen una fuente adicional de contaminación y un riesgo sanitario considerable. La falta de una gestión integral de estos recursos no solo impide que el rastro opere de manera más eficiente y rentable, sino que lo aleja del cumplimiento de normativas ambientales fundamentales como la NOM-001-SEMARNAT-1996 (que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales) y la NOM-002-SEMARNAT-1996 (relacionada con la incineración de residuos), así como las disposiciones de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Estas normativas buscan garantizar un medio ambiente sano y promover el desarrollo sustentable en México. A esto se suma la corta capacitación del personal y la limitada disponibilidad de recursos administrativos y técnicos, factores que agravan el escenario y perpetúan un ciclo de ineficiencia y contaminación.

En este entendido, la comunidad que reside en las cercanías del rastro vive una realidad donde los impactos socioambientales son palpables y cotidianos. Las encuestas y observaciones preliminares indican que los habitantes perciben negativamente la contaminación generada por las aguas residuales, expresando profunda preocupación por sus efectos en la salud y en el medio ambiente local. Más del 60% de los vecinos reporta experimentar malos olores de forma constante o frecuente, y casi el 60% percibe ruidos molestos habituales. De manera aún más crítica, un abrumador 76.6% de la población cercana ha notado cambios negativos en la calidad del agua de los ríos y arroyos, vinculándolos directamente con la operación del rastro. Esta observación empírica, sumada a que la mayoría de los encuestados reporta problemas de salud principalmente gastrointestinales, subraya que la descarga de aguas residuales sin tratamiento adecuado, la gestión deficiente de residuos y la proliferación de olores y fauna nociva no son meros inconvenientes, sino riesgos directos para la salud pública y la calidad de vida de las familias, especialmente de los grupos más vulnerables.

Ante este panorama, surge la imperante necesidad de evaluar a profundidad las implicaciones socioambientales que conlleva el proceso productivo del rastro municipal. Una comprensión detallada de estos impactos, desde la perspectiva tanto de los operadores como de la comunidad afectada, es fundamental para identificar los puntos críticos de mejora y, en consecuencia, diseñar estrategias de manejo integral que aborden eficientemente la descarga de aguas residuales, la generación de residuos de manejo especial y de agentes biológico-infecciosos, buscando no solo el cumplimiento normativo, sino la mejora sustancial de la convivencia y el equilibrio ambiental.

La economía circular y la valorización de residuos es un enfoque en aumento ya que se da valor a los subproductos de las aguas residuales donde se busca la recuperación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo o la producción de biogás para la generación de energía, transformando los residuos en recursos y mejorando la sostenibilidad de las operaciones comunes.

2. METODOLOGÍA

Para la presente investigación, el diseño de la metodología adopta un enfoque mixto, es decir, cuantitativo y cualitativo, y se centra en ser un diseño no experimental de corte transversal con un alcance descriptivo. Este enfoque es ideal para comprender las implicaciones socioambientales del rastro, particularmente en relación con la contaminación del aire como son la aparición de diversos olores, contaminación del agua, suelo y ruido que afectan la calidad de vida de la población residente en las cercanías.El presente estudio se cimenta en la descripción de los fenómenos tal como ocurren en su entorno natural. No se manipularán variables, sino que se observará, medirá y analizará la situación existente en un momento determinado. Este diseño transversal permite recolectar datos de la percepción de la comunidad en un punto

específico en el tiempo, proporcionando una imagen de la situación actual.

La elección de esta metodología mixta es crucial para abordar la dificultad de las implicaciones socioambientales, ya que integra la robustez de los datos numéricos con la riqueza de la comprensión humana. La inclinación cuantitativa se encarga de la recopilación y el análisis de datos numéricos que permiten medir y caracterizar los impactos ambientales directos. Esto incluye la cuantificación de la percepción de la sociedad a través de cuestionarios ajustados. Los resultados se procesarán mediante herramientas estadísticas para generar datos precisos sobre la percepción de los problemas.

La vertiente cualitativa se enfocará en comprender e interpretar los fenómenos sociales, las experiencias, los significados y las perspectivas de las personas. A través de entrevistas en profundidad con la comunidad vecinal y personal del rastro, se buscará desentrañar el porqué de las percepciones, las historias detrás de los impactos, y las dinámicas sociales que rodean al rastro. Este enfoque cualitativo es esencial para captar la dimensión humana y social de la problemática. La inclusión de esta metodología mixta es trascendental, ya que asegura la fiabilidad y fortalece así la validez y la credibilidad de la investigación al combinar diferentes tipos de evidencia.

A continuación, se describe las actividades a desarrollar.

A. Buscar información sobre las implicaciones socioambientales de las aguas residuales y residuos del rastro municipal.
    - Identificar y seleccionar la información encontrada sobre los estudios que aporten comprensión de la problemática en el rastro municipal desde una perspectiva socioambiental.
    - Recolectar y organizar la información más relevante.
    - Analizar la información .

B. Conocer la Situación Actual en el Rastro Municipal.
    - Solicitar acceso para visitar el Rastro Municipal.
    - Realizar observación de procesos del Rastro.

C. Evaluación de la Percepción Socioambiental de la Comunidad.
    - Diseñar y validar instrumentos de recolección de datos.
    - Definir la población objetivo.
    - Aplicar los instrumentos de recolección de datos.

D. Análisis, Interpretación y Conclusiones de Datos.
    - Preparación de datos.
    - Análisis de datos.

En esta investigación, se utilizó una encuesta para conocer sobre las implicaciones socioambientales según la percepción de los vecinos del rastro municipal al vivir en un radio no mayor a los 400 metros alrededor del mismo, de acuerdo con la muestra seleccionada. Para la recolección de datos y la generación de gráficos, se utilizó la herramienta Google Forms.

Con el fin de conocer más sobre el rastro municipal objetivo se levantó una entrevista al personal del primer turno de los dos que operan en este establecimiento, para obtener datos que permitan tener más conocimiento sobre las actividades, operabilidad, el uso del agua y su contaminación. Después se transformará la información obtenida mediante gráficas en el programa IBM SPSS Statistics.

Para esta investigación, se utilizaron dos instrumentos principales de recolección de datos, cada uno diseñado para capturar información específica y complementar el enfoque metodológico mixto del estudio, siendo estos:

1.- Encuesta de percepción socioambiental (para la Comunidad Vecinal): este instrumento se diseñó para cuantificar la percepción de las implicaciones socioambientales del rastro municipal. Se dirigió a la muestra de los vecinos que residen en un radio no mayor a 400 metros alrededor del rastro, ya que son quienes experimentan de manera más directa los posibles impactos como la contaminación del aire (olores), agua, suelo y ruido, afectando su calidad de vida. La encuesta, de naturaleza predominantemente cuantitativa, fue estructurada con preguntas cerradas y escalas de Likert para facilitar la medición de actitudes y frecuencias. Los datos obtenidos de esta encuesta serán analizados y visualizados mediante gráficas directamente en Google Forms, aprovechando sus herramientas integradas para una rápida tabulación y representación visual de los resultados.

2.- Entrevista (para empleados del rastro): este instrumento, de naturaleza cualitativa, se empleó para obtener información detallada y profunda sobre las actividades, operabilidad, uso del agua y su contaminación dentro del rastro municipal. Las entrevistas se dirigieron a los empleados de uno de los dos turnos operativos del rastro, seleccionados por su conocimiento directo y experiencia en las tareas diarias; además como se mencionó anteriormente, se recabó la percepción de los trabajadores del primer turno, debido a que en este turno se lleva a cabo el proceso de sacrificio y descarne de los animales, generándose altos volúmenes de agua residual de dicho proceso; mientras que el segundo turno se centra en el proceso de empaquetado y distribución. Esta guía permitió explorar en profundidad sus perspectivas, desafíos y el "porqué" de ciertos procedimientos. Los datos cualitativos obtenidos de estas entrevistas serán posteriormente analizados, codificados para identificar temas recurrentes, categorías significativas y los resultados se organizarán y visualizarán gráficamente mediante análisis de contenido en el programa IBM SPSS Statistics, para complementar la comprensión de la problemática.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la aplicación de los instrumentos, se identificó que las entrevistas a los trabajadores del rastro municipal ofrecieron una perspectiva clara sobre los tipos de residuos sólidos que se generan, además de la carne, y cómo estos pueden afectar el entorno social y ambiental. La mayoría de los encuestados que representan el 80% (4 de 5) de los trabajadores (ver Figura 1), señalaron el pelo, los cuernos, las pezuñas y la lana como los principales subproductos generados en el rastro, además de la carne. Este alto porcentaje destaca que estos materiales son una constante en las operaciones del rastro y, al ser difíciles de degradar y ocupar mucho espacio, pueden generar problemas importantes. Si no se manejan de forma adecuada, pueden atraer animales no deseados, causar malos olores, contaminar el suelo y el agua.

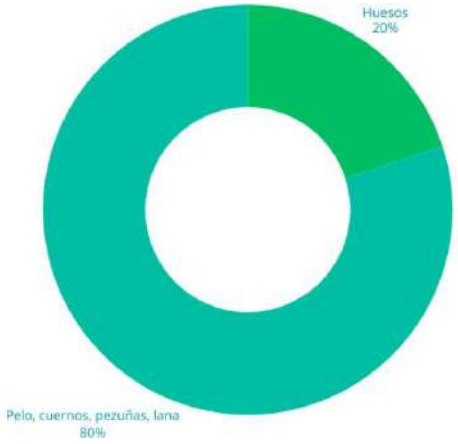


Figura 1. Residuos generados.

La Figura 2, muestra que de las entrevistas realizadas a los trabajadores del rastro sobre su conocimiento acerca de cómo se manejan y adónde van los residuos biológico-infecciosos (RPBI) revelaron una preocupante falta de información clara, lo que genera inquietudes en cuanto a la gestión ambiental y la salud pública.

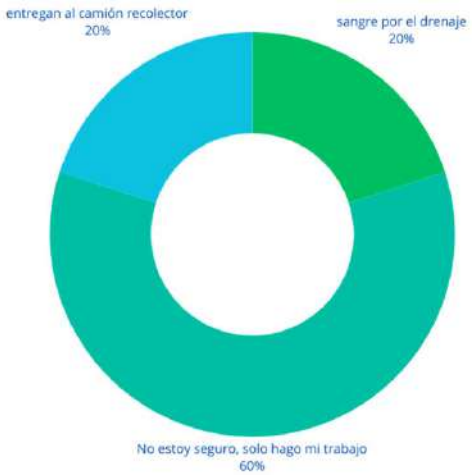


Figura 2. Manejo de residuos.

Del porcentaje de la mayoría, que representa un 60% (3 de 5) de los trabajadores, expresó incertidumbre. Es una respuesta que causa preocupación, ya que hace notar que el personal que trabaja con los residuos peligrosos no conoce su destino final. Esta falta de trazabilidad representa un riesgo no solo para la salud de los propios trabajadores, sino también para la comunidad y el medio ambiente en general. Lo anterior destaca la necesidad de implementar un programa de capacitación específico y de establecer un protocolo claro sobre el manejo seguro y la disposición final de los RPBI, que cumpla con la normativa vigente (como la NOM-087-ECOL-SSA1-2002 en México).

Las entrevistas realizadas a los cinco trabajadores del rastro municipal, ofrecen una perspectiva valiosa sobre los principales impactos ambientales que ellos perciben en las operaciones diarias. Los resultados muestran una percepción dividida y predominante en dos áreas, donde el porcentaje representado por el 40% (2 de 5) de los trabajadores mencionó que los olores son lo que más se nota. Este hallazgo es coherente con la naturaleza de un rastro, donde la descomposición de materia orgánica, el manejo de subproductos y las descargas de aguas residuales tienden a liberar gases que generan malos olores. La alta visibilidad de este impacto lo convierte en una fuente constante de quejas de los vecinos y afecta directamente la calidad de vida de los vecinos (ver Figura 3).

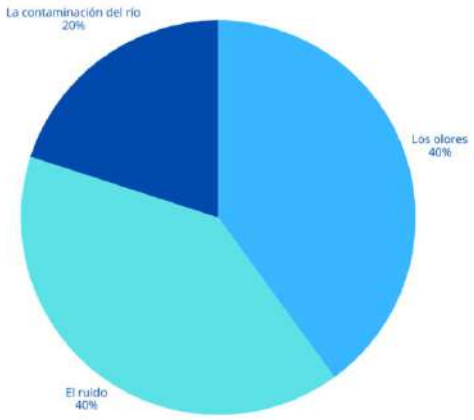


Figura 3. Principales impactos ambientales.

En la Figura 4, se muestra que de acuerdo con los resultados obtenidos, un destacado 43.4% de los encuestados está, totalmente de acuerdo, en que las aguas residuales del rastro impactan negativamente en la calidad del agua del río cercano, y un 32.8% que sigue en segunda posición de porcentajes dice estar simplemente, de acuerdo. Al sumar los porcentajes de estas dos categorías, se revela que un abrumador 76.2% de la población cercana al rastro considera que hay un impacto negativo en las aguas residuales de los cuerpos de agua circundantes. Este altísimo porcentaje es sumamente preocupante, ya que indica una percepción generalizada y una profunda preocupación por un problema ambiental potencialmente grave.

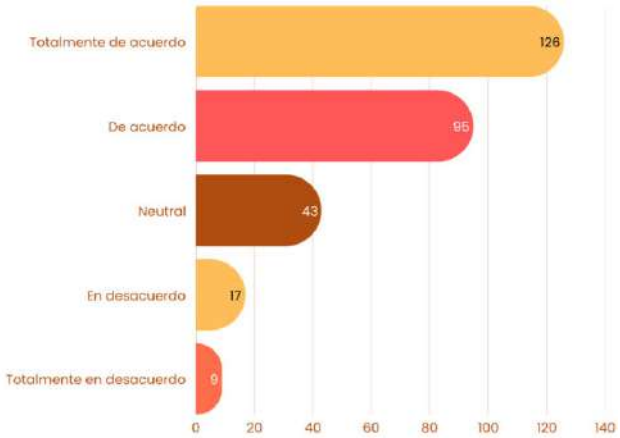


Figura 4. Afección de las aguas residuales en el agua potable para consumo.

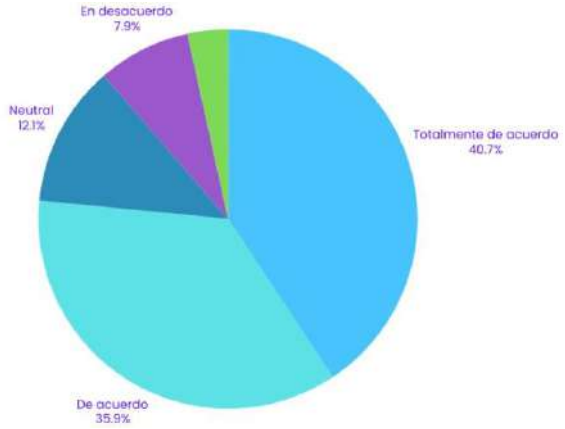


Figura 5. Percepción de cambios en el ecosistema.

Los resultados revelan una alta preocupación y consistente entre los vecinos del rastro municipal donde la mayoría ha notado un deterioro en la calidad del agua del río cercano y lo relacionan directamente con las operaciones del rastro (ver Figura 5). De manera impresionante, podemos apreciar un porcentaje del 40.7% de los encuestados que están totalmente de acuerdo en que han observado cambios negativos en el agua, vinculándolos al rastro. A esto se le suma una representación del 35.9% adicional que simplemente está, de acuerdo, con esta afirmación.

Ahora bien, dadas estas perspectivas, la Tabla 1 presenta las implicaciones socioambientales de los mataderos.

4. CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo como objetivo general evaluar las implicaciones socioambientales del proceso productivo del rastro municipal, a partir de la percepción de sus trabajadores y de la comunidad, con el fin de diseñar estrategias de manejo integral que mitiguen los impactos en el uso de agua, la gestión de residuos tanto sólidos, especiales y biológico-infecciosos, así como el control de olores y ruido.

Respecto al diagnóstico de las prácticas actuales del rastro en el uso del agua y el manejo de residuos, desde entrevistas con personal operativo se identificó que, existe una percepción de contaminación generada por las aguas residuales, contaminación por sólidos y un riesgo biológico-infeccioso, sí la gestión no es la adecuada o si ocurre un accidente que exponga los residuos al medio ambiente.

En relación con el análisis de la percepción de la comunidad vecinal al rastro municipal respecto a los principales impactos

Tabla 1. Implicaciones socioambientales.

Causa o Problema Identificado (según Encuestas)	Implicación Socioambiental (Ambiental)	Implicación Socioambiental (Social)
1.- Descarga de efluentes sin pretratamiento. Donde se observó que el 60% de los trabajadores mencionaron que la sangre es vertida directamente al drenaje, y el 76.6% de los vecinos encuestados reportaron deterioro y evidente contaminación del agua del río.	* Contaminación hídrica: las altas cargas de materia orgánica como son la sangre, grasa, y tejidos, aumentan la carga de DBO y DQO, agotando el oxígeno disuelto en el cuerpo de agua receptor. * Contaminación visual y olfativa: la presencia de sangre y muchos residuos visibles altera desagradablemente la apariencia del río y genera malos olores en la zona de descarga.	* Afectación a la calidad de vida: la percepción de “agua sucia” y “los malos olores” impacta directamente en el bienestar de la comunidad vecinal. *Riesgos a la salud: la presencia de patógenos y la insalubridad del entorno pueden contribuir a problemas gastrointestinales y dermatológicos, como lo reportó el 53.1% de los vecinos.
2. Manejo deficiente de residuos sólidos y biológico-infecciosos (RPBI). Donde el 60% de los trabajadores reporta que la separación de residuos no es adecuada y “todo va al mismo bote”.	*Riesgo de contaminación cruzada: la mezcla de residuos orgánicos, inorgánicos y RPBI aumenta el riesgo de dispersión de patógenos. *Proliferación de fauna nociva: la acumulación de residuos en contenedores abiertos o sin segregación atrae insectos, roedores y otros vectores de enfermedades. *Potencial de olores: la descomposición de la materia orgánica no separada genera fuertes olores fétidos.	*Riesgos a la salud pública: la inadecuada gestión de residuos biológico-infecciosos representa un riesgo directo de contagio para trabajadores y la comunidad. *Afectación a la estética y sanidad urbana: la percepción de falta de orden y limpieza en la gestión de residuos genera una mala imagen y desvaloriza el entorno del rastro.
3. Contaminación por olores y ruido. Donde el 64.9% de los vecinos percibe malos olores de forma frecuente o constante; el 59.7% percibe ruido constante o de forma muy habitual.	*Contaminación atmosférica: la emisión de gases y compuestos volando por la descomposición de materia orgánica genera una calidad del aire un tanto deficiente. *Contaminación acústica: el ruido de las operaciones (maquinaria, animales, vehículos) supera los niveles aceptables, afectando el ambiente.	*Deterioro de la calidad de vida: los olores y el ruido son contaminantes directos que impiden el disfrute de la zona, afectando la tranquilidad y el bienestar de los vecinos. *Problemas de salud: la convivencia constante con estos contaminantes puede causar estrés, insomnio y problemas respiratorios.

socioambientales como los olores, el ruido, la contaminación del agua y su relación con posibles afectaciones a la salud.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bailone, R., Roça, R., Fukushima, H., & de Aguiar, L. K. (2021). Sustainable water management in slaughterhouses by cleaner production methods—a review. *Renewable Agriculture and Food Systems*, *36*(2), 215–224. https://doi.org/10.1017/S1742170520000083

Bulu, Y. I., & Oladoja, N. A. (2025). *Impacts of Rural Intensive Industries Wastewater on Ecological Systems* (pp. 1–29). https://doi.org/10.1007/978-3-031-90314-4_1

Cheng, M., McCarl, B., & Fei, C. (2022). Climate Change and Livestock Production: A Literature Review. *Atmosphere*, *13*(1), 140. https://doi.org/10.3390/atmos13010140

Gadipelly, C., Pérez-González, A., Yadav, G. D., Ortiz, I., Ibáñez, R., Rathod, V. K., & Marathe, K. V. (2014). Pharmaceutical Industry Wastewater: Review of the Technologies for Water Treatment and Reuse. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *53*(29), 11571–11592. https://doi.org/10.1021/ie501210j

Nauman, K., Nauman, A., & Arshad, M. (2023). Slaughter Wastes-A Curse or Blessing: An Appraisal. In *Climate Changes Mitigation and Sustainable Bioenergy Harvest Through Animal Waste* (pp. 35–67). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26224-1_2

Ng, M., Dalhatou, S., Wilson, J., Kamdem, B. P., Temitope, M. B., Paumo, H. K., Djelal, H., Assadi, A. A., Nguyen-Tri, P., & Kane, A. (2022). Characterization of Slaughterhouse Wastewater and Development of Treatment Techniques: A Review. *Processes*, *10*(7), 1300. https://doi.org/10.3390/pr10071300

Papakonstantinou, G. I., Voulgarakis, N., Terzidou, G., Fotos, L., Giamouri, E., & Papatsiros, V. G. (2024). Precision Livestock Farming Technology: Applications and Challenges of Animal Welfare and Climate Change. *Agriculture*, *14*(4), 620. https://doi.org/10.3390/agriculture14040620

Shende, A. D., Dhenkula, S., Waghambare, A., Rao, N. N., & Pophali, G. R. (2022). Water consumption, wastewater generation and characterization of a slaughterhouse for resource conservation and recovery. *Water Practice and Technology*, *17*(1), 366–377. https://doi.org/10.2166/wpt.2021.122

Sohil, A., & Kichloo, M. A. (2023). Sustainable Solutions to Animal Waste: Climate Change Mitigation and Bioproduct Harvest. In *Climate Changes Mitigation and Sustainable Bioenergy Harvest Through Animal Waste* (pp. 301–332). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26224-1_12

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Integrating Advanced Imputation and Genetic Algorithms to Enhance Ovarian Classification

Valeria Maeda-Gutiérrez [*] **Juan José Oropeza-Valdez** [***]
Luis C. Reveles-Gómez [*]
Andrea Guadalupe Rodríguez-López [**]
Carlos E. Galván-Tejada [*] **Jorge I. Galván-Tejada** [*]

[*] *Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Jardín Juárez 147, Centro, Zacatecas 98000, Mexico (e-mail: valeria.maeda@uaz.edu.mx; luiscarlosreveles@uaz.edu.mx; ericgalvan@uaz.edu.mx; gatejo@uaz.edu.mx).*
[**] *Instituto Nacional de Salud Pública, Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: andrea.rodriguez@insp.edu.mx).*
[***] *Centro de Ciencias de la Complejidad, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México (e-mail: juan.oropeza@c3.unam.mx).*

Abstract: Ovarian cancer is one of the leading causes of gynecological cancer-related mortality worldwide, mainly due to delayed diagnosis and the limited sensitivity of traditional screening methods. This study proposes a predictive framework based on the CatBoost algorithm to improve the classification of benign and malignant ovarian tumors using clinical data. Missing values were imputed using Multiple Imputation by Chained Equations (MICE) with Random Forest (RF) estimator to ensure data completeness and minimize bias. The dataset included 49 features, from which a Genetic Algorithm (GA) identified the most informative subset of eight variables: AST, CA125, CEA, HCT, HE4, IBIL, K, and PDW. The model was trained and validated using 5-fold cross-validation, and its performance was optimized through a grid search. Two experimental configurations were evaluated: one using all features and another with the GA-reduced subset. The full-feature model achieved an area under the curve (AUC) of 0.925 and an accuracy of 0.857, while the reduced model maintained generalization with an AUC of 0.925 and an accuracy of 0.876. High precision (0.9318), specificity (0.9444), and F1-score (0.8632) indicated consistent predictive reliability. The integration of MICE imputation with RF and GA-based feature selection within the CatBoost framework provides a robust approach for ovarian cancer prediction and early clinical decision support.

Keywords: Ovarian cancer, MICE, genetic algorithm, machine learning, CatBoost

1. INTRODUCTION

Ovarian cancer (OC) ranks among the top ten causes of cancer-related morbidity and mortality in women worldwide. In 2022, approximately 324,603 new cases and 206,956 deaths were reported, corresponding to an age-standardized incidence rate (ASR) of 6.7 and an ASR mortality rate of 4.0 per 100,000 women, respectively (World Cancer Research Fund (2022); Caruso et al. (2025)). While China, India, and the United States (US) accounted for the largest case burden, the highest incidence rates were reported in Latvia, Samoa, Brunei, Lithuania, and Poland. Regarding mortality, India recorded the largest number of deaths, followed by China and the US, with the highest ASR-adjusted mortality in Indonesia, Russia, and the Philippines. In US alone, projections estimate 20,890 new diagnoses and 12,730 deaths for 2025 (Caruso et al. (2025)).

Biologically, OC is a heterogeneous and complex disease that may arise from diverse ovarian cell lineages and affect women across a broad age range. Histopathologically, it is classified into epithelial carcinomas (90%), germ cell tumors (5%), and sex cord-stromal tumors (5%) (Boussios et al. (2017); Fernández et al. (2024)). Among epithelial carcinomas, subtypes are further divided into benign, borderline, and malignant forms, each displaying distinct molecular and clinical characteristics (Köbel and Kang (2022); Fernández et al. (2024)). This heterogeneity complicates diagnosis and prognosis, challenging conventional clinical and pathological approaches that often fail to effectively integrate diverse biological and clinical variables.

Consequently, OC represents not only a major global health concern but also a diagnostic and therapeutic challenge that demands innovative, data-driven approaches to improve early detection and patient outcomes. In recent years, machine learning (ML) has emerged as a transformative tool for OC research, enhancing tumor classification, prognosis estimation, and decision support (Noei Teymoordash et al. (2025)). Multiple studies us-

ing clinical and biochemical data have demonstrated the potential of ML to outperform traditional methods. For instance, ensemble and explainable models (e.g, SHAP-based stacking, SVM ensembles) have achieved accuracies ranging from 85% to 96%, revealing key biomarkers such as CA-125, CA19-9, CEA, and HE4 as major predictors (Abuzinadah et al. (2023); Lu et al. (2020); JM and Subbulakshmi (2024)). Similarly, feature selection approaches like Boruta, recursive feature elimination (RFE), principal component analysis (PCA), and mutual information (MI) have been show to improve classification accuracy by eliminating redundant variables and emphasizing the most discriminative features (Öznacar and Güler (2025)).

Despite these advances, several limitations of these methodologies persist. Many datasets contain incomplete or noisy information, and basic imputation strategies may introduce bias. Furthermore, most models rely on predefined feature sets, neglecting the potential of optimization-based algorithms to discover novel variable combinations that enhance model performance. To address these limitations, the present study proposes a hybrid framework that integrates advanced imputation techniques with genetic algorithm (GA)-based feature optimization to enhance classification robustness, generalizability, and clinical relevance in OC prediction.

2. MATERIALS AND METHODS

Fig. 1 presents an overview of the methodological workflow adopted in this study.

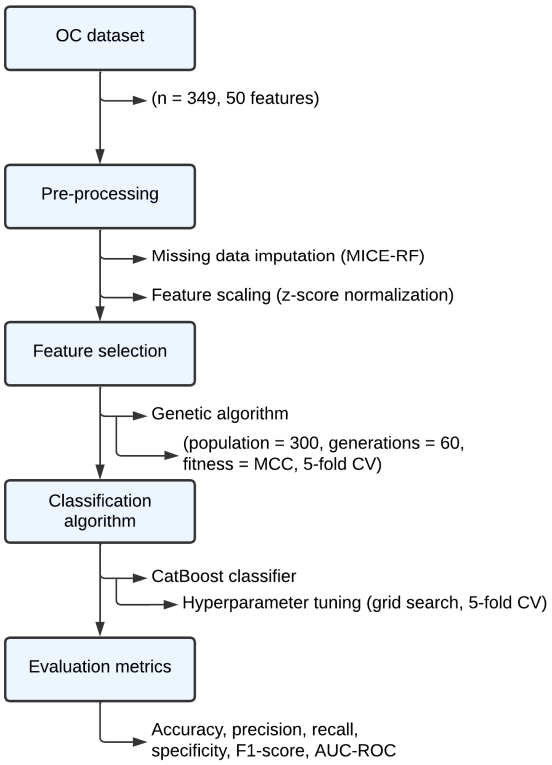


Fig. 1. Workflow of the proposed methodology for OC classification.

The process begins with the OC dataset, which is first subjected to a pre-processing stage involving missing data imputation and normalization via $z - score$ scaling. Subsequently, a GA is applied for feature selection, reducing dimensionality and retaining only the most informative predictors. The selected features are then utilized to train a categorical boosting (CatBoost) classifier. Finally, model performance is assessed using multiple evaluation metrics, including accuracy, precision, recall, specificity, and the area under the receiver operating characteristic curve (AUC-ROC).

2.1 Dataset description

The dataset comprised records from 349 patients treated at the Third Affiliated Hospital of Soochow University (Lu et al. (2020)). This retrospective cohort, spanning July 2011 to July 2018, included 171 individuals diagnosed with OC and 178 cases of benign ovarian tumors. A detailed list of the variables included in each subgroup is presented in Table 1.

Table 1. Summary of dataset features and their descriptions.

Variable	Description
Blood routine tests	
BASO#	Absolute basophil count
BASO%	Basophil percentage
EO#	Absolute eosinophil count
EO%	Eosinophil percentage
HCT	Hematocrit
HGB	Hemoglobin
LYM#	Absolute lymphocyte count
LYM%	Lymphocyte percentage
MCH	Mean corpuscular hemoglobin
MCV	Mean corpuscular volume
MONO#	Absolute monocyte count
MONO%	Monocyte percentage
MPV	Mean platelet volume
NEU	Neutrophils
PDW	Platelet distribution width
PLT	Platelets
RBC	Red blood cells
RDW	Red cell distribution width
General chemistry indicators	
ALB	Albumin
AG	Albumin/Globulin ratio
ALP	Alkaline phosphatase
ALT	Alanine aminotransferase
AST	Aspartate aminotransferase
BUN	Blood urea nitrogen
Ca	Calcium
CL	Chloride
CO2CP	Carbon dioxide content
CREA	Creatinine
DBIL	Direct bilirubin
GGT	Gamma-glutamyl transferase
GLO	Globulin
GLU	Glucose
IBIL	Indirect bilirubin
K	Potassium
Mg	Magnesium
Na	Sodium
PCT	Procalcitonin
PHOS	Phosphate
TBIL	Total bilirubin
TP	Total protein
UA	Uric acid
Tumor markers	
AFP	Alpha-fetoprotein
CA125	Cancer antigen 125
CA19-9	Cancer antigen 19-9
CA72-4	Cancer antigen 72-4
CEA	Carcinoembryonic antigen
HE4	Human epididymis protein 4
Demographic	
Age	Age of the individual
Menopause	Menopausal status
Outcome	
TYPE	Diagnostic status: 0 = benign, 1 = malignant

A total of 50 variables were available, of which 49 corresponded to clinical features, while the 50th represented the

outcome variable (TYPE), encoded as 0 for benign and 1 for malignant cases. The clinical features were originally organized into three subgroups: (1) blood routine tests; (2) general chemistry indicators and (3) tumor markers.

2.2 Pre-processing

Missing entries were identified in 20 out of the 49 clinical variables. For the most hematological and biochemical indicators, the proportion of missing values was relatively low (typically below 10%). In contrast, within the tumor marker subgroup, the variable CA72-A exhibited a substantial proportion of missingness, being absent in 240 out of 349 patients (68.8%). Due to this excessive level of incompleteness, CA72-4 was excluded from further analysis.

The pre-processing stage involved two main steps: (i) missing data imputation using Multiple Imputation by Chained Equations (MICE) with Random Forest (RF) estimator, and (ii) feature standardization via z-score normalization.

The MICE-RF procedure was implemented to model the conditional dependencies among variables and generate plausible imputations. For each variable containing missing entries, an RF regressor was trained using the remaining complete variables as predictors, capturing nonlinear relationships and feature interactions (Stekhoven and Bühlmann (2012)). The iterative imputation process followed these steps:

(1) Initialize missing values with simple estimates;
(2) For each variable containing missing entries, fit a RF model using the observed values as the response and the remaining features as predictors;
(3) Predict the missing values using the fitted RF model;
(4) Update the dataset with the newly imputed values;
(5) Repeat steps 2–4 iteratively for all variables until convergence or until the maximum number of iterations is reached.

After imputation, all continuous variables were standardized using the z-score transformation to ensure comparability and numerical stability across features. This transformation rescales each variable to have a zero mean and unit variance, as shown in Equation 1:

$$x' = \frac{x - \mu}{\sigma}. \tag{1}$$

where μ is the mean and σ is the standard deviation of the feature.

2.3 Feature selection

For the identification of relevant clinical predictors, a penalized feature selection approach based on Genetic Algorithms (GA) was implemented using the Distributed Evolutionary Algorithms in Python (DEAP) library Fortin et al. (2012). GA operates directly on the original set of variables to identify the most informative subset, representing an adaptive heuristic search inspired by natural selection and evolutionary genetics.

A detailed description of the GA-based procedure for feature selection is provided below:

- Chromosome representation: each individual is a binary vector of length p (number of features). Initialization is sparse, activating a random number of genes k. A repair operator enforces the constraint 'at most 8 features' and prevents empty solutions.
- Fitness function: the objective is to maximize the Matthews Correlation Coefficient (MCC) obtained by a 10-fold stratified cross-validation (CV) of a binary logistic regression (LR) (solver=*liblinear*, L_2-penalty, *max_iter*=1000). Individuals with $k = 0$ or $k > 8$ are penalized.
- Genetic operators:
  - Selection: tournament selection with tournament size = 3; elitism preserves the top 2 individuals per generation.
  - Crossover: two-point crossover applied with probability 0.5 to parent pairs; offspring are repaired to satisfy the ≤ 8 features constraint.
  - Mutation: bit-flip mutation with independent bit probability = 0.05; an overall mutation trigger probability of 0.2 per offspring is used. Post-mutation repair is applied.
- Optimization process: the population is initialized with $N = 300$ individuals. The algorithm runs for up to 60 generations with early stopping if no improvement in the best fitness is observed for 12 consecutive generations (stagnation limit). In each generation: evaluate fitness → select parents (plus elitism) → crossover and mutation (with repair) → evaluate invalid offspring → from the new population. Convergence is monitored by tracking the best and mean fitness per generation. After evolution, the best individual defines the GA-selected subset; a final LR is fitted on the entire dataset restricted to this subset, and performance is additionally summarized via stratified 10-fold CV with aggregated confusion matrices.

2.4 Classification algorithm

CatBoost is an ML developed by Yandex researchers and engineers in 2017. It belongs to the family of gradient boosting methods and employs binary decision trees (DTs) as base learners (Prokhorenkova et al. (2018)).

A distinctive advantage of CatBoost lies in its implementation of ordered boosting, a modification of the conventional gradient boosting process that effectively prevents target leakage. This approach ensures that each iteration of the model is trained only on data available prior to prediction, thereby enhancing reliability and reducing overfitting. Additionally, the algorithm incorporates target statistics to handle categorical features more effectively, enabling the transformation of such variables into numerical representations while preserving their predictive relationships.

Formally, given a dataset $D = \{(X_j, y_j)\}_{j=1}^{m}$, where $X_j = (x_j^1, x_j^2, \ldots, x_j^n)$ denotes an n-dimensional feature vector and $y_j \in \mathbb{R}$ represents the corresponding target value, CatBoost aims to learn a function $H : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ that minimizes the expected loss $\mathcal{L}(H) = \mathbb{E}\, L(y, H(X))$. The model iteratively updates according to:

$$H^t = H^{t-1} + \alpha g^t,$$

where α is the learning rate and g^t is a weak learner selected from a pool of base models to minimize the residual errors (Ibrahim et al. (2020); Zamzam et al. (2024)).

2.5 Evaluation metrics

The performance of the proposed model was quantitatively assessed using several metrics derived from the confusion matrix. These include True Positive (TP), False Positive (FP), True Negative (TN), and False Negative (FN), defined as follows:

- TP = number of malignant cases correctly classified;
- FP = number of benign cases incorrectly classified;
- TN = number of benign cases correctly classified;
- FN = number of malignant cases incorrectly classified as benign.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \tag{2}$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \tag{3}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}, \tag{4}$$

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP}, \tag{5}$$

$$F1 - score = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}, \tag{6}$$

$$AUC = \frac{\text{Recall} - (1 - \text{Specificity})}{2}. \tag{7}$$

In binary classification problems, these metrics provide complementary insights into the model's predictive behavior. Accuracy measures the overall proportion of correctly classified instances, providing a general indication of performance. Precision quantifies the proportion of correctly predicted positive cases among all instances labeled as positive, reflecting the model's ability to avoid false alarms. Recall (sensitivity) measures the proportion of actual positive cases, which is particularly relevant in medical diagnosis. Specificity denotes the proportion of correctly identified negative cases, indicating how well the model distinguishes benign from malignant instances. The F1-score, defined as the harmonic mean of precision and recall, provides a balanced measure when dealing with imbalanced datasets. Finally, the AUC-ROC evaluates the model's discriminative capability across different classification thresholds, where values closer to 1.0 indicate superior performance (Rainio et al. (2024)).

3. RESULTS

Table 2 presents the descriptive statistics of the clinical, biochemical, and hematological variables included in the study. The comparison between benign and malignant ovarian tumor groups is expressed as mean ± standard deviation (Mean ± SD), along with the corresponding p-values indicating statistical significance. All values were computed after data imputation using the MICE method with the RF estimator.

Table 2. Comparative analysis of clinical parameters between benign and malignant ovarian tumor groups.

Variable	Benign (Mean±SD)	Cancer (Mean±SD)	p-value
AFP	2.71 ± 2.17	25.35 ± 138.15	**0.0335**
AG	19.22 ± 4.10	19.40 ± 4.60	0.7003
Age	37.44 ± 12.51	52.98 ± 13.49	**< 0.001**
ALB	43.16 ± 3.92	38.97 ± 6.28	**< 0.001**
ALP	67.67 ± 19.56	86.45 ± 57.80	**0.0001**
ALT	18.04 ± 10.42	17.90 ± 11.80	0.9117
AST	17.34 ± 6.90	20.92 ± 9.37	**0.0001**
BASO#	0.03 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.2843
BASO%	0.52 ± 0.36	0.44 ± 0.33	**0.0458**
BUN	4.02 ± 1.15	4.01 ± 1.42	0.9452
Ca	2.46 ± 0.28	2.32 ± 0.42	**0.0005**
CA125	51.45 ± 79.79	723.90 ± 1046.99	**< 0.001**
CA19-9	25.91 ± 40.36	71.12 ± 166.62	**0.0007**
CEA	1.47 ± 0.88	5.37 ± 15.04	**0.0009**
CL	100.73 ± 2.36	100.90 ± 3.52	0.6042
CO2CP	24.03 ± 2.36	24.54 ± 2.97	0.0812
CREA	65.11 ± 10.77	63.35 ± 12.59	0.1612
DBIL	3.35 ± 1.45	2.91 ± 1.34	**0.0029**
EO#	0.07 ± 0.08	0.06 ± 0.06	0.1316
EO%	1.24 ± 1.29	1.00 ± 0.94	**0.0448**
GGT	19.78 ± 18.50	22.71 ± 17.24	0.1261
GLO	29.28 ± 3.70	31.05 ± 5.04	**0.0002**
GLU.	5.12 ± 0.85	5.56 ± 1.48	**0.0009**
HCT	0.39 ± 0.04	0.38 ± 0.05	**0.0211**
HE4	49.17 ± 39.07	349.77 ± 499.20	**< 0.001**
HGB	128.34 ± 13.70	122.20 ± 16.71	**0.0002**
IBIL	6.55 ± 3.15	5.38 ± 2.52	**0.0001**
K	4.39 ± 0.39	4.38 ± 0.41	0.9181
LYM#	1.70 ± 0.55	1.41 ± 0.54	**< 0.001**
LYM%	29.27 ± 9.70	22.74 ± 10.05	**< 0.001**
MCH	29.20 ± 2.36	28.34 ± 2.71	**0.0018**
MCV	88.34 ± 5.32	87.79 ± 6.71	0.3979
Mg	0.98 ± 0.12	0.98 ± 0.13	0.7756
MONO#	0.33 ± 0.13	0.39 ± 0.16	**0.0002**
MONO%	5.40 ± 1.82	5.77 ± 2.01	0.0694
MPV	10.11 ± 1.70	9.98 ± 1.78	0.5017
Na	140.09 ± 2.35	140.91 ± 3.26	**0.0075**
NEU	63.16 ± 10.89	70.06 ± 11.11	**< 0.001**
PCT	0.23 ± 0.07	0.27 ± 0.10	**< 0.001**
PDW	14.74 ± 2.74	13.91 ± 3.19	**0.0090**
PHOS	1.12 ± 0.19	1.12 ± 0.18	0.6719
PLT	230.25 ± 57.33	281.65 ± 117.44	**< 0.001**
RBC	4.40 ± 0.41	4.31 ± 0.52	0.0643
RDW	13.43 ± 1.59	13.68 ± 2.00	0.2060
TBIL	9.91 ± 4.40	8.29 ± 3.61	**0.0002**
TP	72.44 ± 5.11	69.67 ± 8.78	**0.0004**
UA	241.26 ± 58.18	246.25 ± 78.04	0.4998

Statistically significant inter-group differences were observed across several variables. Notably, tumor markers such as CA125, HE4, and CEA presented considerably elevated concentrations in malignant cases. Furthermore, hematological parameters, including NEU, LYM%, and HGB, displayed significant variations, indicating systemic physiological differences associated with malignancy. Concurrently, biochemical indicators were notably diminished in malignant patients, aligning with metabolic alterations and nutritional dysregulation frequently associated with cancer advancement.

To evaluate the performance and robustness of the proposed predictive model, a series of experiments was conducted under two distinct feature configurations. This section presents the quantitative assessment of the CatBoost classifier when applied to both the complete and reduced feature sets, allowing for a systematic comparison of how dimensionality and feature optimization affect the

model's discriminative ability. The evaluation process was designed to address two main objectives: (1) to establish a performance baseline using all available variables, and (2) to determine whether a subset of optimized features could achieve comparable or superior classification accuracy with reduced model complexity.

3.1 Scenario 1: Full feature set

The CatBoost classifier was trained using the complete set of 48 clinical features. Hyperparameter tuning was performed through a 5-fold cross-validation (CV) grid search, which identified the optimal configuration with a tree depth of 6, 400 boosting iterations, an L2 leaf regularization value of 3.0, and a learning rate of 0.1. The optimized model was subsequently evaluated on both the training and test partitions to assess its predictive and generalization capability.

Fig. 2 and Fig. 3 illustrate the confusion matrices derived from the CatBoost model.

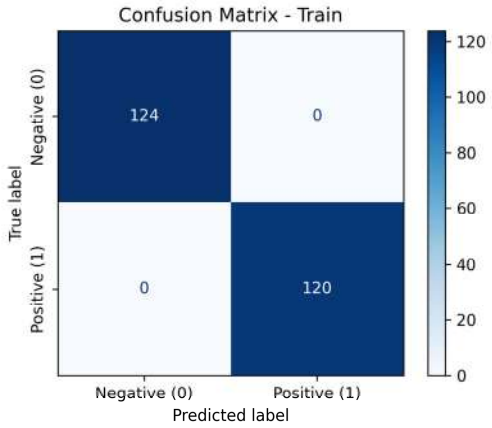


Fig. 2. Confusion matrix of the CatBoost classifier on the training set using all 48 clinical features.

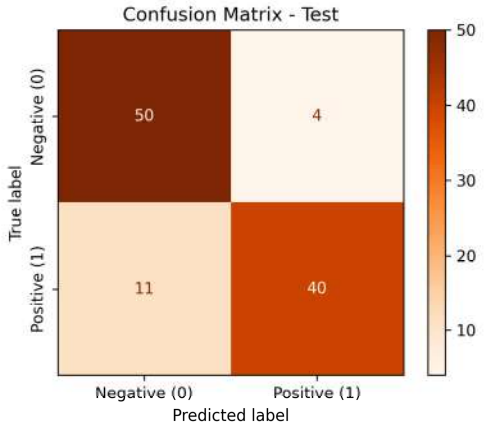


Fig. 3. Confusion matrix of the CatBoost classifier on the test set using all 48 clinical features.

The training matrix exhibits flawless classification performance, achieving perfect accuracy without any misclassifications in either class, thereby indicating the model's successful assimilation of training data patterns. Conversely, the test matrix reveals a minor decline in performance, characterized by 11 FN and 4 FP. Notwithstanding these slight misclassifications, the classifier consistently demonstrated a robust capacity to differentiate between benign and OC instances.

Fig. 4 and Fig. 5 present the ROC curves derived from the CatBoost classifier. As depicted in Fig. 4, the model achieved an AUC of 1.0 on the training set, signifying perfect discrimination between positive and negative instances and affirming its capacity to fully internalize the inherent data patterns. In contrast, the test set demonstrated an AUC of 0.925, indicating strong discriminatory power and suggesting effective generalization to previously unobserved samples.

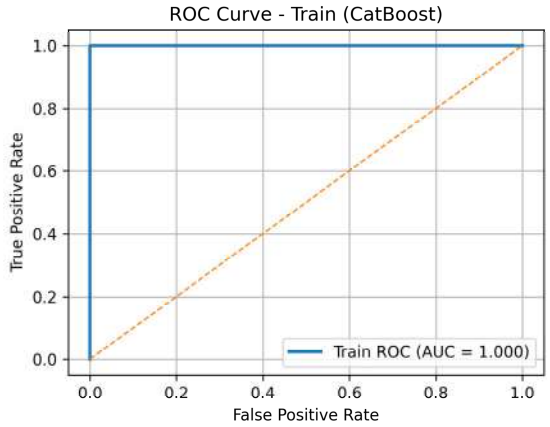


Fig. 4. ROC curve for the training set obtained using the CatBoost model.

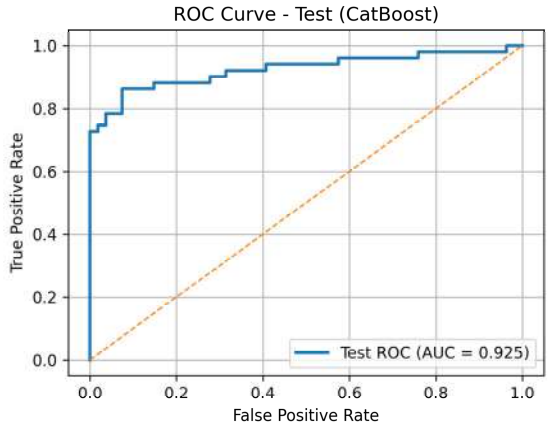


Fig. 5. ROC curve for the test set obtained using the CatBoost classifier.

Table 3 summarizes the classifier's performances metrics.

The model demonstrated optimal performance on the training dataset, achieving perfect scores. Upon evaluation using an independent test set, the model demonstrated robust predictive capability, as indicated by an AUC of 0.925 and an overall accuracy of 0.8571. Precision indicated a

low rate of FP, while recall demonstrated effective identification of positive cases, despite a moderate reduction compared to the training phase. Specificity confirmed dependable differentiation of negative instances, and the F1-score signified a balanced performance between precision and recall.

3.2 Scenario 2: Reduced feature set

In order to reduce dimensionality, a GA was employed to identify the most informative subset of features from the original 48 clinical attributes. The optimization process was guided by the Matthews Correlation Coefficient (MCC) as the fitness function, maximizing the classifier's discriminative ability across generations. As shown in Fig. 6, the GA achieved convergence after approximately 40 generations, with the best fitness value stabilizing around 0.7986, while the mean population fitness plateaued at approximately 0.7844. This trend reflects a rapid optimization process and consistent improvement across generations, demonstrating the algorithm's effectiveness in identifying a compact and discriminative subset of features.

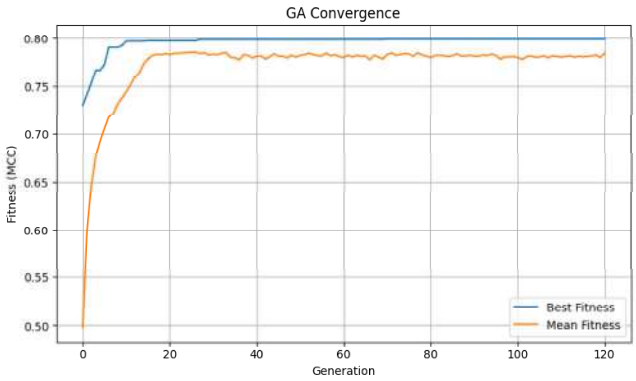


Fig. 6. Convergence curve of GA for feature selection based on MCC optimization (the blue line represents the best fitness per generation, while the orange line denotes the mean population fitness).

The final feature subset selected by the GA comprised the following variables: AST, CA125, CEA, HCT, HE4, IBIL, K, and PDW.

These attributes represent a combination of tumor biomarkers, hematological indicators, and biochemical parameters, all of which are clinically relevant for differentiating benign from malignant ovarian tumor cases. The selected variables were subsequently used as input features for retraining the CatBoost classifier. The model underwent hyperparameter optimization through a 5-fold CV grid search, following the same protocol applied in the first experimental scenario.

Table 3. Performance metrics of the CatBoost classifier.

Metric	Training Set	Test Set
AUC	1.000	0.925
Accuracy	1.000	0.8571
Precision	1.000	0.9091
Recall	1.000	0.7843
Specificity	1.000	0.9259
F1-score	1.000	0.8421

The best-performing configuration was obtained with a tree depth of 6, 200 boosting iterations, an L2 leaf regularization value of 5.0, and a learning rate of 0.1. This optimized setup was the employed to train and evaluate the model using the reduced feature set, aiming to assess the impact of dimensionality reduction on predictive performance and generalization capability.

Fig. 7 and Fig. 8 display the confusion matrices for the training and test partitions, respectively, obtained using the eight GA-selected variables. The model correctly classified most cases in both partitions, with a moderate number of FN and a low FP rate. In the training set, the model achieved 120 TN and 99 TP, with 25 misclassifications in total. For the test partition, the classifier maintained consistent behavior, with 51 TN and 41 TP, misclassifying only 13 instances overall.

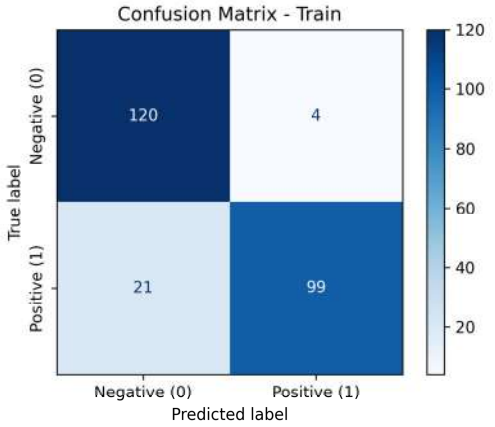


Fig. 7. Confusion matrix of the CatBoost classifier on the training set using the reduced subset of eight GA-selected features.

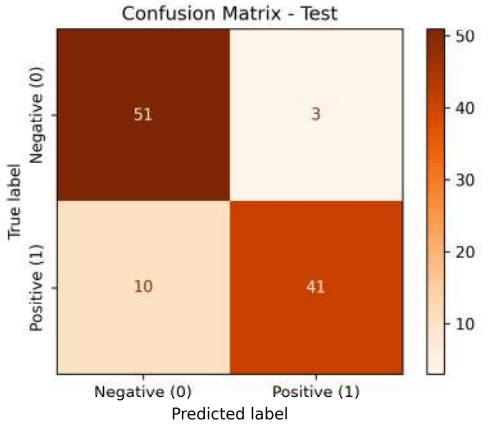


Fig. 8. Confusion matrix of the CatBoost classifier on the test set using the reduced subset of eight GA-selected features.

Fig. 9 and Fig. 10 depict the ROC curves for training and test subsets. The CatBoost classifier achieved an AUC of 0.965 on the training data, evidencing excellent class separability and stable convergence throughout the

optimization process. When evaluated on the test set, the model yielded an AUC of 0.925, confirming that the discriminative power remained high when generalizing to unseen data. The slight decrease in AUC relative to the training is expected and reflects an adequate balance between model complexity and generalization capability.

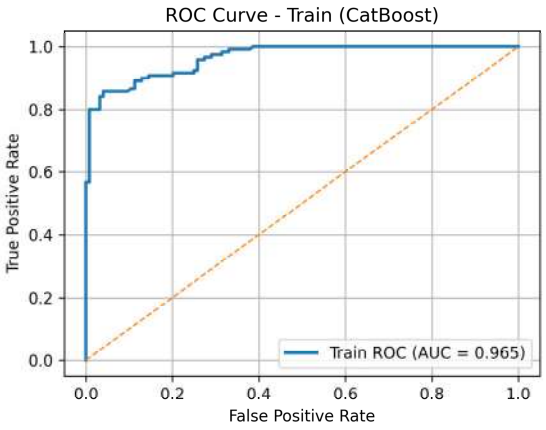


Fig. 9. ROC curve of the CatBoost classifier on the training set using the reduced subset.

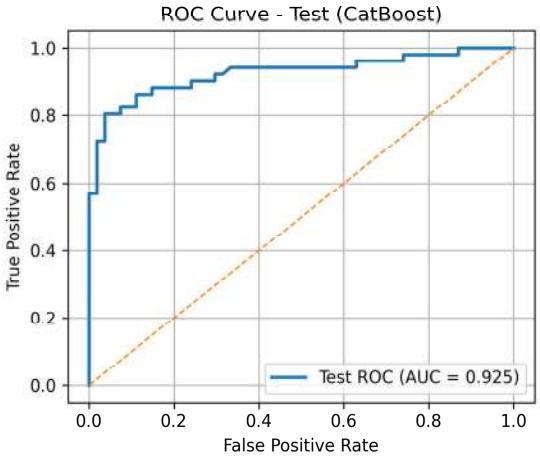


Fig. 10. ROC curve of the CatBoost classifier on the test set using the reduced subset.

These results demonstrate that the GA-based dimensionality reduction did not compromise predictive performance.

Table 4 summarizes the performance of the model using the reduced subset. The model exhibited consistent and reliable predictive behavior across both data partitions. During the training phase, it achieved an AUC of 0.965 and an accuracy of 0.8975, demonstrating high discriminative strength and convergence stability. The precision and specificity metrics reveal the model's capacity to correctly identify negative cases while maintaining a low FP rate. Meanwhile, the recall reflects efficient sensitivity toward positive cases, resulting in a balanced F1-score that confirms coherent performance across evaluation dimensions.

Table 4. Performance metrics of the CatBoost classifier using the GA-selected subset of eight features.

Metric	Training Set	Test Set
AUC	0.965	0.925
Accuracy	0.8975	0.8762
Precision	0.9612	0.9318
Recall	0.8250	0.8039
Specificity	0.9677	0.9444
F1-score	0.8879	0.8632

The evaluation on the independent test set showed a comparable outcome, with an AUC of 0.925 and accuracy of 0.8762. High precision and specificity reaffirm the robustness of the model in correctly recognizing benign instances, while the recall demonstrated stable detection of OC cases.

4. DISCUSSION

ML-based approaches have increasingly gained attention in oncological research as powerful tools for improving early diagnosis and personalized treatment (Hormaty et al. (2025)). However, most predictive models for OC rely on heterogeneous clinical datasets with incomplete information, leading to variability in performance and limited generalizability. In this context, the present study proposes a robust computational framework that integrates MICE with RF estimation, GA-based feature selection, and the CatBoost classifier to enhance diagnostic reliability in distinguishing benign from malignant ovarian tumors.

The MICE with RF imputation proved particularly advantageous for handling missing data in high-dimensional clinical contexts. Unlike single-value imputations (mean, median, or regression). MICE iteratively predicts each missing variable based on all others, preserving the multivariate relationships among features. The integration of RF as the predictive estimator introduces several key benefits: it captures nonlinear and high-order interactions between variables, is robust to outliers and non-normal distributions, and reduces variance through ensemble averaging, minimizing imputation bias. These properties enhance internal data consistency and improve model generalization, particularly in biomedical applications where heterogeneity is intrinsic. This advantage has been consistently demonstrated in healthcare settings, where MICE, combined with RF, outperforms traditional parametric methods by preserving clinical dependencies and reducing systematic bias in large-scale patient datasets (Kokla et al. (2019)).

Following the imputation stage, a systematic grid search optimization was conducted to fine-tune the hyperparameters of the CatBoost classifier across both experimental configurations. This process was crucial in balancing model complexity and convergence dynamics. For the full feature configuration, the optimal combination (depth = 6, iterations = 400, L2 leaf regulation value = 3.0, learning rate = 0.1) enabled stable convergence and efficient learning across the 48-variable input space, preventing premature saturation and ensuring adequate feature utilization. Conversely, the GA-reduced configuration, optimized with (depth = 6, iterations = 200, L2 leaf regulation = 5.0, learning rate = 0.1), demonstrated stronger regularization and reduced model variance, reflecting the intrinsic

benefits of a compact, information-dense feature subset. The increased L2 leaf regulation value favored smoother decision boundaries, mitigating overfitting risks commonly observed in small or imbalanced biomedical datasets.

The comparative evaluation between the full-feature and GA-reduced configurations revealed consistent yet distinct performance dynamics. The full model, trained on 48 clinical and biochemical variables, achieved an AUC of 0.925 and an accuracy of 0.857, indicating strong discriminative power across the multidimensional feature space. Nonetheless, the inclusion of redundant informative variables introduced moderate variability in recall across folds. In contrast, the GA-reduced configuration, limited to eight informative biomarkers, maintained the same AUC (0.925), confirming that dimensionality reduction preserved the model's discriminative capability. From clinical performance perspective, the GA-optimized model achieved higher precision (0.9318) and specificity (0.9444), underscoring its ability to correctly identify benign cases and minimize FP, an essential attribute in cancer screening, where unnecessary interventions can have psychological and economic costs; the sensitivity (0.8039) demonstrates that the model identified the majority of malignant cases, even after substantial reduction. From a clinical standpoint, this enhancement translates into a higher probability of detecting true cancer cases (an essential improvement for early diagnosis and patient management).

Building upon these findings, a comparative analysis with previous studies further highlights the advantages and positioning of the proposed framework. For instance, Lu et al. (2020), employed MRMR algorithm followed by a DT classifier using a reduced subset of two biomarkers (HE4 and CEA). Although their approach achieved a slightly higher AUC (0.95), the simplicity of the model and the limited feature diversity may restrict generalization to broader clinical populations.

In terms of performance, although the proposed CatBoost-GA configuration achieved a lower AUC (0.925) than that reported by Lu et al. (2020) (0.95), this difference ($< 3\%$) is marginal and obtained under more stringent validation conditions with a broader and more heterogeneous feature set. The close agreement between training and testing results supports the model's generalization capability, contrasting with the nearly identical metrics reported by Lu et al. (2020), which may suggest overfitting due to the simplicity of their model and the limited number of features employed.

Similarly, JM and Subbulakshmi (2024) employed the MRMR method to select 18 relevant variables and implemented multiple classifier and ensemble strategies, including support vector machine (SVM), DT, k-nearest neighbors (KNN), and stacking ensembles. Nevertheless, their study did not report specificity or sensitivity metrics, limiting the evaluation of the model's diagnostic. By contrast, our CatBoost-GA achieved high specificity (0.9444) and moderate recall (0.8039) with fewer features, underscoring its stronger clinical applicability.

In the study by Ahamad et al. (2022), the RF demonstrated the best performance among several supervised algorithms, achieving an accuracy of 0.88, a recall of 0.95, and an AUC of 0.87 using 49 attributes. Furthermore, when evaluated across different data groups, the results indicate that the proposed CatBoost-GA achieves a competitive performance compared to 0.91, precision 1.0, recall 0.86, F1-score 0.92, and AUC 0.93. However, the research relied on the full set of 49 variables without a structured feature selection stage, which may introduce redundancy and hinder interpretability across data groups.

Öznacar and Güler (2025) applied several feature selection methods –Boruta, RFE, PCA, and MI– to optimize the prediction of early OC diagnosis using 50 variables. Among the evaluated configurations, the CatBoost combined with Boruta reached an accuracy of 0.8952, an F1-score of 0.8946, and an AUC of 0.9502. In comparison, the proposed methodology achieved comparable results using only eight optimized biomarkers, emphasizing a more compact and computationally efficient configuration. The integration of a GA allowed for a systematic exploration of feature combinations that maximize performance.

Overall, the comparative results summarized in Table 5 highlight that the proposed CatBoost-GA attains a competitive performance among state-of-the-art ML models for OC prediction. Although the sensitivity (80.39%) was lower than that of some ensemble-based studies such as Ahamad et al. (2022), this moderate trade-off reflects a clinically acceptable balance between detecting malignant cases and avoiding unnecessary interventions. The reduction in this metric can be attributed to the compact feature set, which favors robustness and generalization over exhaustive recall.

From a methodological standpoint, the integration of MICE-RF imputation, GA-based feature selection, and the CatBoost classifier yielded a computationally efficient and interpretable pipeline capable of handling high-dimensional, heterogeneous clinical data. The comparison with previous works confirms that the proposed framework achieves comparable or superior accuracy with fewer variables, thereby enhancing interpretability and clinical feasibility.

5. CONCLUSION

The present study introduced a CatBoost-based predictive framework for ovarian tumor classification, integrating MICE imputation with RF estimator and GA-driven feature selection. The approach successfully identified a concise subset of eight features –AST, CA125, CEA, HCT, HE4, IBIL, K, and PDW– that preserved most of the model's discriminative capacity while substantially reducing redundancy. These variables may reflect key biological mechanisms associated with tumor progression, inflammation, and metabolic dysregulation. Specifically, CA125, CEA, and HE4 are recognized biomarkers suggestive of epithelial malignancies, whereas AST, HCT, and IBIL could indicate systemic alterations in hepatic and hematologic function under cancer-related metabolic stress. Moreover, K and PDW may be linked to electrolyte and hematopoietic imbalances, which are potentially associated with disease severity. The reduced feature model achieved performance comparable to the full configuration, demonstrating that these biomarkers contain sufficient diagnostic information for robust classification. Beyond com-

Table 5. Comparison of feature selection and classification methods for ovarian cancer prediction.

Author	Feature selection method	# of features	Best classification algorithm	Evaluation metrics
Lu et al. (2020)	MRMR	49	DT	ACC: 87%; SE: 82%; SP: 95%; AUC: 0.95
Ahamad et al. (2022)	–	49	RF	ACC: 88%; AUC: 0.87; SE: 95%; F1-score: 0.89
JM and Subbulakshmi (2024)	MRMR	18	SVM Ensemble (stacking)	Base SVM: ACC = 85% Ensemble: ACC = 89%
Öznacar and Güler (2025)	Boruta RFE PCA MI	20 (Boruta) 10 (RFE/MI)	CatBoost	ACC: 89.52%; F1: 0.8946; SE: 89%; AUC: 0.9505
This study	GA	8	CatBoost	ACC: 87.62%; SE: 80.39%; SP: 94.44%; AUC: 0.925

Note. ACC = Accuracy; SE = Sensitivity; SP = Specificity; AUC = Area under the curve.

putational efficiency, this framework highlights clinically interpretable predictors that are measurable through routine blood analysis, supporting minimally invasive, data-driven screening strategies for OC detection. Although the proposed CatBoost-GA framework demonstrated high predictive accuracy and generalization within the available dataset, certain limitations should be acknowledged. The study relied on a relatively moderate sample size and excluded imaging or molecular features that could enhance predictive granularity. Additionally, the stochastic nature of GA-based selection may yield variable subsets across independent runs. Combining deterministic and hybrid selection strategies could therefore improve feature stability in future work. External validation using independent cohorts and real-world clinical data will be crucial to assess the reproducibility and translational feasibility of the model. Moreover, extending the framework beyond binary classification toward multiclass grading or survival prediction may provide broader clinical applicability and support integration into decision-support systems.

REFERENCES

Abuzinadah, N., Kumar Posa, S., Alarfaj, A.A., Alabdulqader, E.A., Umer, M., Kim, T.H., Alsubai, S., and Ashraf, I. (2023). Improved prediction of ovarian cancer using ensemble classifier and shaply explainable ai. *Cancers*, 15(24), 5793.

Ahamad, M.M., Aktar, S., Uddin, M.J., Rahman, T., Alyami, S.A., Al-Ashhab, S., Akhdar, H.F., Azad, A., and Moni, M.A. (2022). Early-stage detection of ovarian cancer based on clinical data using machine learning approaches. *Journal of personalized medicine*, 12(8), 1211.

Boussios, S., Moschetta, M., Zarkavelis, G., Papadaki, A., Kefas, A., and Tatsi, K. (2017). Ovarian sex-cord stromal tumours and small cell tumours: Pathological, genetic and management aspects. *Critical reviews in oncology/hematology*, 120, 43–51.

Caruso, G., Weroha, S.J., and Cliby, W. (2025). Ovarian cancer: a review. *JAMA*.

Fernández, A.P., Barbas, J.P., Fernández, B.C., and Sánchez, A.R. (2024). Epidemiología e historia natural del cáncer de ovario. *Revisiones en cáncer*, 38(4), 149–155.

Fortin, F.A., De Rainville, F.M., Gardner, M.A.G., Parizeau, M., and Gagné, C. (2012). Deap: Evolutionary algorithms made easy. *The Journal of Machine Learning Research*, 13(1), 2171–2175.

Hormaty, S., Seiwan, A.N., Rasheed, B.H., Parvaz, H., Gharahzadeh, A., and Ghaznavi, H. (2025). A review on biomarker-enhanced machine learning for early diagnosis and outcome prediction in ovarian cancer management. *Cancer Medicine*, 14(17), e71224.

Ibrahim, A., Muhammed, M.M., Sowole, S.O., Raheem, R., and Abdulaziz, R.O. (2020). Performance of catboost classifier and other machine learning methods. *Data Sci*, 1–14.

JM, S.L. and Subbulakshmi, P. (2024). Innovative approach towards early prediction of ovarian cancer: Machine learning-enabled xai techniques. *Heliyon*, 10(9).

Köbel, M. and Kang, E.Y. (2022). The evolution of ovarian carcinoma subclassification. *Cancers*, 14(2), 416.

Kokla, M., Virtanen, J., Kolehmainen, M., Paananen, J., and Hanhineva, K. (2019). Random forest-based imputation outperforms other methods for imputing lc-ms metabolomics data: a comparative study. *BMC bioinformatics*, 20(1), 492.

Lu, M., Fan, Z., Xu, B., Chen, L., Zheng, X., Li, J., Znati, T., Mi, Q., and Jiang, J. (2020). Using machine learning to predict ovarian cancer. *International journal of medical informatics*, 141, 104195.

Noei Teymoordash, S., Zendehdel, H., Norouzi, A.R., and Kashian, M. (2025). Diagnostic accuracy of artificial intelligence algorithms to predict remove all macroscopic disease and survival rate after complete surgical cytoreduction in patients with ovarian cancer: a systematic review and meta-analysis. *BMC surgery*, 25(1), 27.

Öznacar, T. and Güler, T. (2025). Prediction of early diagnosis in ovarian cancer patients using machine learning approaches with boruta and advanced feature selection. *Life*, 15(4), 594.

Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A.V., and Gulin, A. (2018). Catboost: unbiased boosting with categorical features. *Advances in neural informa-*

tion processing systems, 31.

Rainio, O., Teuho, J., and Klén, R. (2024). Evaluation metrics and statistical tests for machine learning. *Scientific Reports*, 14(1), 6086.

Stekhoven, D.J. and Bühlmann, P. (2012). Missforest—non-parametric missing value imputation for mixed-type data. *Bioinformatics*, 28(1), 112–118.

World Cancer Research Fund (2022). Ovarian cancer statistics. `https://www.wcrf.org/preventing-cancer/cancer-statistics/ovarian-cancer-statistics/`. Accessed: 2025-09-23.

Zamzam, Y.F., Saragih, T.H., Herteno, R., Nugrahadi, D.T., Huynh, P.H., et al. (2024). Comparison of catboost and random forest methods for lung cancer classification using hyperparameter tuning bayesian optimization-based. *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics*, 6(2), 125–136.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Sustainable assessment of extractive distillation for ethanol dehydration using ionic liquids as entrainers

Lizeth Saraí Ávila-Loaiza*, Elsa Hynmar Fernández-Martínez [*] Arturo Elías-Domínguez [*]

[*] *Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Tlaxcala, C.P. 90300, México (e-mail: 20256940@uatx.mx).*

Abstract: Ethanol is a product of interest due to its many applications, including its use as a renewable and environmentally friendly fuel. E85, the most widely used blend for light-duty vehicles, is composed of 15% gasoline and 85% bioethanol. Due to its high oxygen content, this mixture improves the oxidation of hydrocarbons, lowering the amount of carbon monoxide emissions and aromatic compounds. Extractive distillation is the most common method used for ethanol purification since it is one of the options that consumes the least energy. Ethylene glycol is mainly used as a solvent, nonetheless, there are alternatives to carriers that have been studied to reduce cost, energy, or achieve environmental savings. This study assessed the performance of two ionic liquids (IL) as entrainers in an extractive distillation process to dehydrate ethanol, since IL are known to be green solvents and thus able to obtain a more sustainable process. Isobaric vapor-liquid equilibrium (VLE) data was used to validate the thermodynamics of systems ethanol-water-IL with $[BMIM][BF_4]$, $[EMIM][EtSO_4]$, $[BMIM][Cl]$ and $[BMIM][MSO_4]$, comparing it to the simulator estimation. Extractive distillation designs were obtained to dehydrate ethanol with $[BMIM][BF_4]$ and $[EMIM][EtSO_4]$, as well as sustainability indexes to evaluate their performance, obtaining up to 33.33 % of energy savings required for the process compared to other reported designs and molar purities above 0.99 for the ethanol, water and IL products.

Keywords: sustainability, ethanol dehydration, ionic liquids, extractive distillation.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al incremento en el uso de energías a nivel mundial, se han considerado alternativas de energía renovable, limpia y sostenible, las cuales se han vuelto una parte importante para nuestra salud y economía. El bio-etanol como carburante es una de las mejores alternativas desde el punto de vista ambiental y energético, ya que eleva el octanaje y reduce las emisiones de CO_2 en los gases de escape Frolkova and Raeva (2010), contribuyendo al mejoramiento de la salud y calidad de vida de la población. El bio-etanol es miscible y soluble con la nafta, y sustituye a la gasolina parcial o totalmente. Sin embargo, el bio-etanol obtenido de la fermentación de biomasa es un producto diluido, el cual debe someterse a recuperación y deshidratación antes de su uso como combustible. El bio-etanol utilizado como carburante requiere de una pureza de 99.0 a 99.8 % en peso para evitar fallas en los motores por oxidación o corrosión. Debido al azeótropo que el etanol forma con el agua, generalmente se llevan a cabo dos procesos para alcanzar los niveles de pureza requeridos. En el primer paso, el etanol se pre-concentra hasta aproximadamente un 92-94 % en peso mediante destilación ordinaria.

⋆ Sponsor and financial support acknowledgment goes here. Paper titles should be written in uppercase and lowercase letters, not all uppercase.

En la segunda etapa, se requiere romper el azeótropo que se forma con el agua (con una composición azeotrópica de 95.6 % en peso de etanol) Tututi et al. (2014).

Los dos métodos tradicionales de separación de bio-etanol de alta pureza son la destilación extractiva y la destilación azeotrópica; otras técnicas incluyen la pervaporación, la destilación por cambio de presión, la extracción líquido-líquido, la adsorción y las membranas Frolkova and Raeva (2010). La destilación extractiva (ED, por sus siglas en inglés) es un proceso común para eliminar uno de los componentes del sistema azeotrópico.

Uno de los factores importantes en la eficiencia de la destilación extractiva para conseguir altas purezas de etanol es la elección del acarreador. El acarreador es el tercer componente que se añade para romper el azeótropo y cambiar la volatilidad relativa de la mezcla que se va a separar. Este debe poseer ciertas cualidades como ser estable, no corrosivo, con costos no elevados, selectivo, tener un alto punto de ebullición (superior a 80 °C para poder ser fácilmente separados del agua) y baja toxicidad, entre otros. Algunos de los acarreadores que se utilizan en la destilación extractiva son: solventes, líquidos iónicos (IL, por sus siglas en inglés), sales y polímeros hiperramificados. En este trabajo se utilizaron IL para llevar a

cabo la separación, evaluando ventajas y desventajas de los mismos.

Los líquidos iónicos se conocen desde hace aproximadamente un siglo, pero recién han comenzado a recibir mayor atención en las últimas dos décadas Pereiro et al. (2012). La notable capacidad de ruptura de azeótropos de los IL, su volatilidad casi nula a temperatura ambiente y su facilidad de ser reutilizados, les han otorgado el reconocimiento como posibles alternativas sostenibles a los solventes convencionales. Los IL pueden reemplazar muchos compuestos volátiles tóxicos y peligrosos que se utilizan como agentes de separación. A diferencia de la mayoría de los disolventes convencionales, los IL son sales con un punto de fusión bajo. Son líquidos en un amplio rango de temperaturas y son inertes al aire y al agua. Además, tienen una baja presión de vapor y no contaminan el medio ambiente. Están compuestos de un anión y un catión, como se observa en la Figura 1 para el $[EMIM][EtSO_4]$.

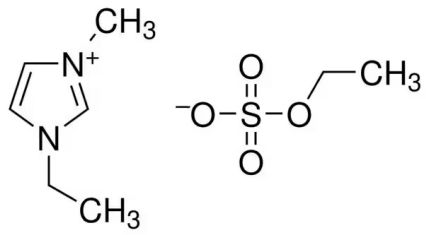


Figura 1. Estructura molecular del $[EMIM][EtSO_4]$

Hasta ahora, la mayoría de los estudios se han centrado en los efectos de los IL en el equilibrio de fases en mezclas de agua y etanol de diversas composiciones Zhao et al. (2006); Jiang et al. (2007); Calvar et al. (2006, 2007, 2008, 2009); Wang et al. (2007b); Ge et al. (2008); Wang et al. (2007a); Faghihi et al. (2020) y en la aplicabilidad de ecuaciones modelo a los equilibrios de fases en sistemas que involucran IL Simoni et al. (2007).

Según Ge et al. (2008), los cuatro IL más adecuados para deshidratar etanol son $[EMIM][Cl]$, $[EMIM][OAc]$, $[EMIM][N(CN)_2]$ y $[BMIM][BF_4]$ Ge et al. (2008). Sin embargo, los IL que contienen Cl^- son corrosivos y tienen una alta viscosidad ($[EMIM][Cl]$: $\eta = 65$ mPas, $[BMIM][Cl]$: $\eta = 142$ mPa.s y $[HMIM][Cl]$: $\eta = 293$ mPa.s, todos a 80 °C y, por lo tanto, no son adecuados. El $[BMIM][BF_4]$ no es estable a temperaturas más altas en presencia de agua y puede formar ácido fluorhídrico (HF), que es muy corrosivo. Sin embargo, este líquido iónico se encuentra disponible comercialmente.

Ge et al. (2008) realizaron un estudio para la selección de LI que pueden usarse potencialmente como acarreadores para la separación de la mezcla azeotrópica etanol-agua mediante destilación extractiva, midieron el equilibrio líquido-vapor (ELV) para los sistemas ternarios agua-etanol-LI, concluyendo que el cloruro de 1-etil-3-metilimidazolio ($[EMIM][Cl]$) tiene el mayor efecto sobre la mejora de la volatilidad relativa. Otro LI, acetato de 1-etil-3- metilimidazolio ($[EMIM][OAc]$), también tiene un efecto significativo, teniendo en cuenta su viscosidad y punto de fusión relativamente bajos, este LI podría ser un candidato favorable como acarreador para una posible aplicación industrial.

Quijada-Maldonado et al. (2014) analizaron los efectos de IL sobre la eficiencia de transferencia de masa en la destilación extractiva para mezclas de agua y etanol. Sus resultados indican que una mayor viscosidad de un disolvente en ED reduce la eficiencia de transferencia de masa del proceso. Este es un parámetro muy importante en el diseño de una columna ED porque una menor eficiencia conduce a columnas con más platos o mayor relleno para lograr la separación requerida. Este problema se vuelve más importante al emplear IL como solventes en ED porque sus viscosidades pueden ser hasta 20 veces mayores en comparación con los solventes orgánicos comúnmente utilizados. Otras propiedades como la densidad, la tensión superficial y la conductividad térmica son similares a las de los disolventes orgánicos comunes. Sin embargo, los LI reducen considerablemente su viscosidad al estar disueltos en la mezcla a separar, y las altas temperaturas en las que opera la ED también reducen la viscosidad. Asimismo, las mejoras en las volatilidades relativas obtenidas de los LI ayudan a superar este efecto (excepto para viscosidades mayores a 65 mPa·s a T = 353.15 K). Adicionalmente, determinaron que, a velocidades de destilado más altas, las volatilidades relativas altas producen efectos negativos en la eficiencia de la transferencia de masa debido a una disminución en la velocidad del vapor.

Ramírez-Corona et al. (2015) encontraron que el parámetro de diseño más importante en la destilación extractiva utilizando líquidos iónicos como acarreadores es la concentración de IL y que el proceso de separación se puede intensificar con el uso de una sola columna, incluso para soluciones diluidas. Además, como la concentración de LI depende del caudal de reflujo, los requisitos más bajos de LI no están necesariamente asociados con la menor concentración de LI.

Zhu et al. (2016) realizaron un estudio para comparar los IL $[EMIM][BF_4]$ y $[BMIM][BF_4]$ como solventes para la deshidratación de etanol. Utilizaron Aspen Plus para simular la viabilidad del proceso y determinar las principales condiciones de operación de la producción de etanol anhidro. Sus resultados muestran que la pureza del destilado de etanol fue superior al 99,9 % molar y revelaron la ventaja de menores requisitos de energía en comparación con el proceso de destilación extractiva que utiliza disolventes convencionales.

Se seleccionaron 4 IL para evaluar el efecto en la volatilidad relativa de la mezcla y por lo tanto, la facilidad para romper el azeótropo de la mezcla etanol-agua:

- $[EMIM][EtSO_4]$
- $[BMIM][BF_4]$
- $[BMIM][Cl]$
- $[BMIM][MSO_4]$

De estos se seleccionaron dos IL para obtener diseños de destilación extractiva: ($[BMIM][BF_4]$) y ($[EMIM][EtSO_4]$).

2. METODOLOGÍA

Se realizaron simulaciones rigurosas en estado estacionario en el simulador Unisim Design R492. Las propiedades termodinámicas del Equilibrio Líquido Vapor (VLE, por sus siglas en inglés) de los sistemas ternarios se calcularon con el modelo de composición local NRTL. Se es-

timó el equilibrio con los líquidos iónicos: $[EMIM][EtSO_4]$, $[BMIM][BF_4]$, $[BMIM][Cl]$ y $[BMIM][MSO_4]$, y se seleccionaron los IL $[EMIM][EtSO_4]$ y $[BMIM][BF_4]$ para obtener un diseño de destilación extractiva con el fin de observar y comparar los ahorros energéticos, las emisiones de CO_2 y los costos. Para calcular el Costo Anual Total (TAC, por sus siglas en inglés) se utilizaron el costo de inversión y operación de los sistemas, que se estimaron con la metodología de Guthrie. Las variables consideradas fueron la relación solvente-alimentación (S/F), la relación de reflujo (R), el número de etapas (N), la etapa de alimentación (N_F) y la etapa de alimentación del acarreador (N_{IL}).

2.1 Termodinámica de los sistemas

Con el propósito de validar la termodinámica de todas las mezclas ternarias con acarreadores, se estimó el VLE con el modelo NRTL. Para estimar la presión de vapor de cada componente, se utilizó la ecuación de Antoine (1).

$$\ln\left(P^{sat}\right) = A + \frac{B}{T+C} + D\ln T + ET^F \qquad (1)$$

Debido a que los IL no tienen presión de vapor, se ajustaron las constantes de la ecuación de Antoine de tal forma que estos compuestos no volatilicen, siendo A= 0.6, B= -6300, C= 0, D= 1.142, E= 1.56E-20, F= 6.

Los parámetros para el modelo termodinámico NRTL utilizados en este trabajo se muestran en la Tabla 1. Para el $[EMIM][EtSO_4]$ se realizó una regresión con la subrutina GREG en FORTRAN para obtener los parámetros binarios, utilizando los datos experimentales de Calvar et al. (2008). Para el $[BMIM][BF_4]$, $[BMIM][Cl]$ y $[BMIM][MSO_4]$, los datos experimentales se tomaron de Faghihi et al. (2020), Calvar et al. (2006) y Calvar et al. (2009), respectivamente.

Tabla 1. Parámetros de interacción para el modelo NRTL etanol (1) + agua (2) + acarreador (3)

Acarreador	Sistema	Aij $[\frac{cal}{mol}]$	Aji $[\frac{cal}{mol}]$	α
$[BMIM][BF_4]$	1 + 2	-3.4894	872.2619	0.3
	1 + 3	1247.5515	-479.0492	0.3
	2 + 3	-0.4971	-277.854	0.3
$[EMIM][EtSO_4]$	1 + 2	-223.4226	1532.4808	0.303
	1 + 3	-1343.9795	296.56	0.21
	2 + 3	20.1931	-1248.8854	0.365
$[BMIM][Cl]$	1 + 2	-1050.1565	2350.6694	0.094
	1 + 3	-5.8102	-2983.8441	0.098
	2 + 3	1769.5335	-4658.1361	0.093
$[BMIM][MSO_4]$	1 + 2	249.8114	1064.7358	0.57
	1 + 3	-954.9914	63.0689	-0.05
	2 + 3	-3355.3239	95675.8608	0.04

Se calcularon las desviaciones en temperatura y composición entre los datos calculados con NRTL y los datos experimentales con (2) y (3) para validar la termodinámica con los parámetros seleccionados.

$$\sigma_T[K] = \sqrt{\frac{\sum(T_{cal}[K] - T_{exp}[K])^2}{(N-4)}} \qquad (2)$$

$$\sigma_y[K] = \sqrt{\frac{\sum(y_{i,cal} - y_{i,exp})^2}{(N-4)}} \qquad (3)$$

2.2 Destilación extractiva convencional

El sistema de ED consiste en una columna extractiva en donde se obtiene etanol de alta pureza para su uso como carburante, y de un separador flash para recuperar el IL, como se muestra en la Figura 2.

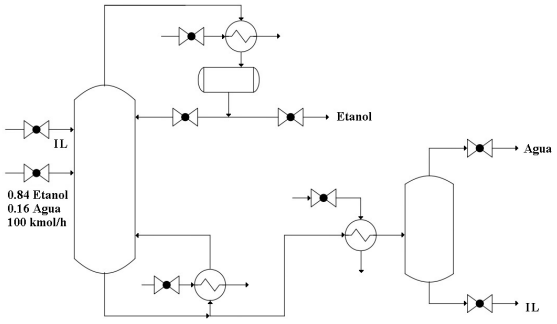


Figura 2. Esquema de separación

El diseño obtenido para los IL seleccionados se muestra en la Tabla 2. Se tomaron como base los diseños de Zhu et al. (2016), en donde usan $[BMIM][BF_4]$ y $[EMIM][BF_4]$ como acarreadores; se eligió el caso con menor consumo en kJ/kg de etanol y se realizaron modificaciones en las variables de diseño como número de etapas (N), relación acarreador/alimentación (S/F) etapa de alimentación(N_F), etapa de alimentación del IL (N_{IL}) y relación de reflujo (R), de manera que se minimicen las cargas térmicas y se obtengan las purezas requeridas de los productos.

Tabla 2. Diseño de ED con IL

	$[BMIM][BF_4]$	$[EMIM][EtSO_4]$
S/F	0.5	0.47
N	40	40
N_F	30	30
N_{IL}	4	4
R	0.33	1

Los IL se introdujeron como pseudo-componentes, ya que, al ser compuestos de reciente creación, no se encuentran en la base de datos del simulador. Se especificaron sus propiedades fisicoquímicas, tales como peso molecular, punto de ebullición normal, densidad del líquido, temperatura crítica, presión crítica, volumen crítico y factor acéntrico. Estas propiedades se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades de los IL

Propiedades	$[BMIM][BF_4]$	$[EMIM][EtSO_4]$	$[BMIM][MSO_4]$	$[BMIM][Cl]$
Mw	226	236.28	250	175
Tb [K]	495.2	712.7	735.6	558
Tc [K]	643.2	1,067.5	1,081.6	789
Pc [kPa]	2,040	40,500	3,610	2,780
Vc $[\frac{m^3}{kmol}]$	0.665	0.6598	0.7169	0.5688
ρ $[\frac{kg}{m^3}]$	1208	1238	1212.4	1080
w	0.8877	0.3744	0.4111	0.4908

En la Figura 3 se muestra el entorno de simulación en UniSim Design R492. El esquema consta de la columna extractiva y el flash para recuperar el IL y el agua. El

esquema se muestra en estado estacionario, y el IL se introdujo como un componente hipotético en el simulador como se mencionó anteriormente.

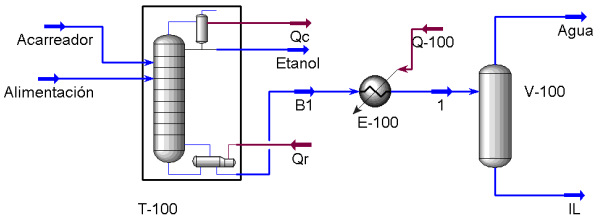


Figura 3. Sistema de ED en estado estacionario

2.3 Costo Anual Total

Los costos de inversión y de operación se calcularon con el método de Guthrie [Biegler et al. (1997)], el cual propone una ecuación para el costo base del equipo (4). A este costo base se añaden otros factores relativos a la presión (MPF), materiales usados (MF) y el costo de instalación del equipo (BC).

$$BMC = UF\,(MF + MPF - 1)\,(BC) \tag{4}$$

Donde UF es el factor de actualización que se calcula con (5)

$$UF = \frac{\textit{índice de costo actual}}{\textit{índice de costo base}} \tag{5}$$

Para recipientes, el costo neto (BC) se estima con (6):

$$BC = C_0 \left(\frac{L[ft]}{L_0}\right)^{\alpha} \left(\frac{D[ft]}{D_0}\right)^{\beta} \tag{6}$$

Para intercambiadores, el BC se calcula con (7):

$$BC = C_0 \left(\frac{S}{S_0}\right)^{\alpha} \tag{7}$$

El área de los intercambiadores se requiere para calcular los costos, y se obtiene con (8):

$$S = \frac{Q_c}{U\Delta T} \tag{8}$$

Se calculó el costo anual total de todos los sistemas de ED con la ecuación de Long and Lee (2012) (9), donde i es la tasa de interés fraccional por año y n es el número de años. Utilizando una tasa de interés del 0.1 % y considerando un periodo de 5 años.

$$TAC = \textit{costo de capital}\,\frac{i\,(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + O_p \tag{9}$$

2.4 Emisiones de CO_2

Se calcularon las emisiones de CO_2 con la ecuación de Gutiérrez-Guerra et al. (2009) (10):

$$[CO_2]_{Emiss} = \left(\frac{Q_{Fuel}}{NHV}\right)\left(\frac{C\,\%}{100}\right)\alpha \tag{10}$$

Donde las emisiones de CO_2 tienen unidades de kg/s, Q_{Fuel} $[kW]$ es la cantidad de combustible quemado en un equipo, NHV es el poder calorífico neto de un combustible con un contenido de carbono de C %, α es la relación de pesos molares de CO_2 y C, ($\alpha = 3{,}67$).

El combustible que se utilizó para obtener las emisiones de carbono fue metano, el cual tiene un contenido de carbono $C\,\% = 75$. La cantidad de combustible quemado se puede calcular con la ecuación de Gadalla et al. (2005) (11):

$$Q_{Fuel} = \frac{Q_{Proc}}{\lambda_{Proc}}\,(h_{Proc} - 419)\,\frac{T_{FTB} - T_0}{T_{FTB} - T_{Stack}} \tag{11}$$

Donde $h_{Proc}\left[\frac{kJ}{kg}\right]$ es la entalpía de vapor entregado al proceso, $\lambda_{Proc}\left[\frac{kJ}{kg}\right]$ es el calor latente entregado al proceso, T_{FTB} es la temperatura de flama de los gases de combustión de la caldera $[°C]$ ($T_{FTB} = 1{,}800°C$), Q_{Proc} $[kW]$ es la carga térmica del equipo, T_0 $(°C)$ es la temperatura ambiente y $T_{Stack} = 160°C$.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Termodinámica de los sistemas

Se requiere que los parámetros de interacción entre componentes para el modelo NRTL estimen correctamente la termodinámica de los sistemas, ya que posteriormente se introducen en el simulador y se caracteriza la deshidratación de etanol con diferentes IL, obteniendo diseños de destilación extractiva. Para validar la termodinámica de los sistemas, se comparó la estimación del VLE contra datos experimentales, y se consiguieron desviaciones aceptables para la temperatura y las fracciones en la fase vapor (Tabla 4).

Tabla 4. Desviaciones de temperatura y composición con el modelo NRTL. [a] Calculado con (2), [b] Calculado con (3)

Acarreador	$\lvert\Delta T\rvert^a_{av}$	$\lvert\Delta y_1\rvert^b_{av}$	$\lvert\Delta y_2\rvert^b_{av}$
$[BMIM][BF_4]$	1.3717	0.0266	0.0166
$[EMIM][EtSO_4]$	0.8617	0.0239	0.0239
$[BMIM][Cl]$	0.7250	0.0270	0.0269
$[BMIM][MSO_4]$	0.8371	0.0086	0.0086

El VLE calculado con los parámetros optimizados para $[EMIM][EtSO_4]$ se comparó con los datos experimentales de Calvar et al. (2008), así como con puntos de burbuja obtenidos en UniSim Design con los mismos parámetros, a diferentes composiciones del IL mediante pseudo-diagramas de la mezcla etanol-agua en presencia de este IL. En la Figura 4 se muestran los datos a una composición $x_3 = 0{,}1$. Tanto los parámetros optimizados como los de la literatura, se acercan a un dato experimental, y se pueden usar ambos para estimar el VLE en el simulador. En este trabajo, se utilizaron los parámetros optimizados para caracterizar la deshidratación de etanol con $[EMIM][EtSO_4]$.

En la Figura 5 se muestran los resultados con $[EMIM][EtSO_4]$ a una composición $x_3 = 0{,}2$, en este caso los parámetros optimizados muestran una tendencia más parecida a los datos experimentales y los puntos de burbuja del simulador coinciden con los datos calculados.

En la Figura 6 se muestran los resultados con $[EMIM][EtSO_4]$ a una composición $x_3 = 0{,}3$, a la cual no hay datos experimentales con los que comparar, sin embargo los puntos

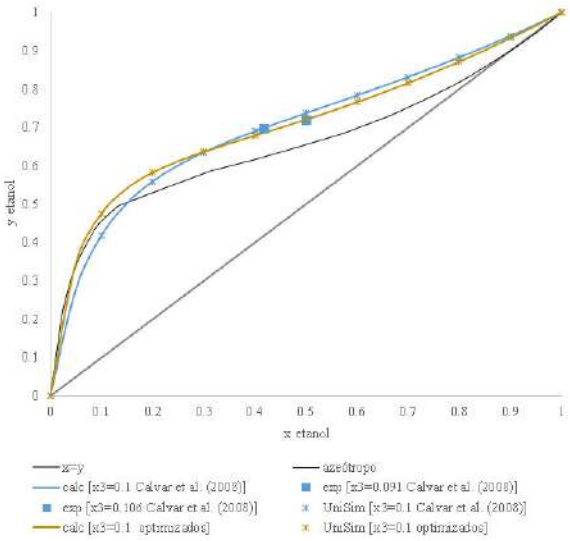


Figura 4. Pseudo-diagrama etanol-agua-$[EMIM][EtSO_4]$ (x_3=0.1)

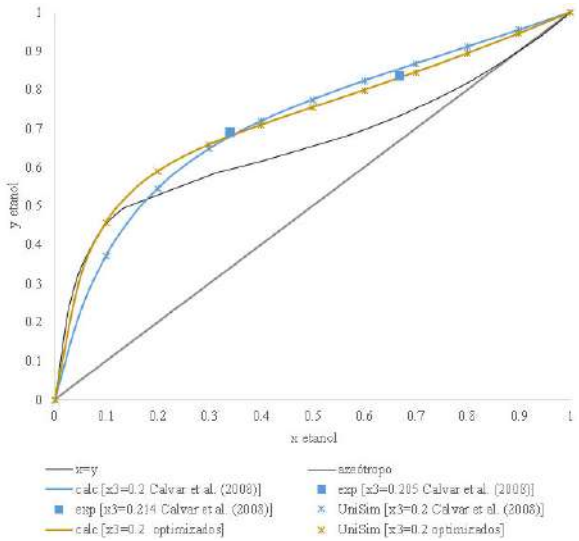


Figura 5. Pseudo-diagrama etanol-agua-$[EMIM][EtSO_4]$ (x_3=0.2)

de burbuja del simulador y los datos calculados coinciden al igual que en los casos anteriores.

Una vez validados los parámetros de interacción con los IL, se compararon los cuatro IL mediante un pseudo-diagrama utilizando una composición molar de 0.3 para el acarreador, con el fin de observar el efecto que tienen sobre la volatilidad relativa de la mezcla etanol-agua. La Figura 7 muestra los resultados a 101.3 kPa, en donde se puede observar que el $[BMIM][MSO_4]$ alcanza una mayor volatilidad relativa respecto a los demás IL, de igual manera, las volatilidades relativas de la mezcla etanol-agua en presencia de $[BMIM][MSO_4]$ y $[EMIM][EtSO_4]$ son similares en la composición azeotrópica, como se observa en el acercamiento realizado para esa composición (0.89 molar).

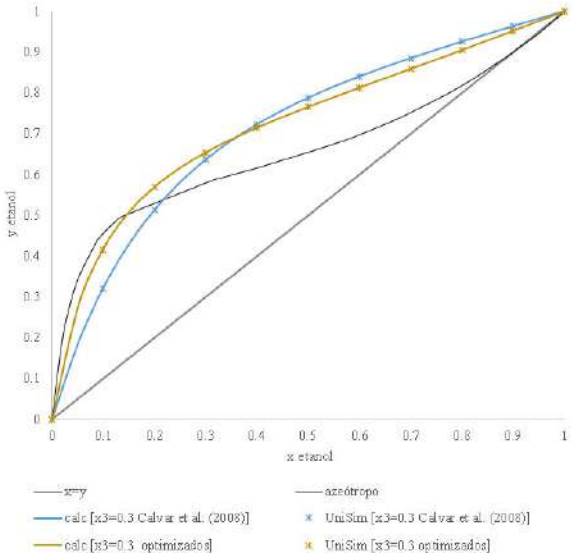


Figura 6. Pseudo-diagrama etanol-agua-$[EMIM][EtSO_4]$ (x_3=0.3)

La validación termodinámica incluye también puntos de burbuja calculados en el simulador UniSim Design. Sin embargo, los puntos de burbuja del simulador no coincidieron con los datos experimentales al utilizar los parámetros para la mezcla binaria agua-$[BMIM][MSO_4]$ y para la mezcla ternaria etanol-agua-$[BMIM][Cl]$, por lo que es necesario optimizar los parámetros de la literatura para asegurarse de que la termodinámica sea representativa en el simulador. Hasta donde se tiene conocimiento, no se han reportado diseños de ED utilizando el $[EMIM][EtSO_4]$ como acarreador en la literatura, de igual manera, este IL abre la curva de equilibrio cerca del azeótropo como el $[BMIM][MSO_4]$. En este trabajo se seleccionaron los IL $[EMIM][EtSO_4]$ y $[BMIM][BF_4]$ para hacer la evaluación sostenible de los diseños de ED.

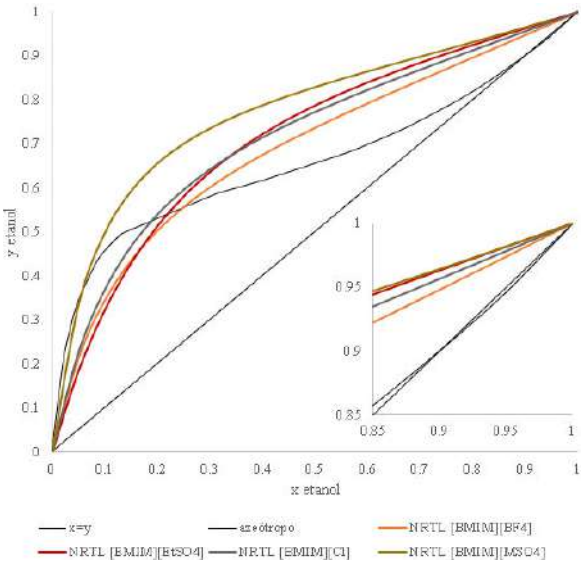


Figura 7. Pseudo-diagrama etanol-agua-IL (x_3=0.3)

3.2 Diseños de destilación extractiva

Se realizaron simulaciones rigurosas de destilación extractiva convencional con los líquidos iónicos $[BMIM][BF_4]$ y $[EMIM][EtSO_4]$. Las purezas molares de los tres productos para cada caso se muestran en la Tabla 5. Para ambos casos, se alcanzaron las purezas requeridas de etanol. Para conseguir una separación eficiente en el flash, las constantes de Antoine de los IL se ajustaron para evitar que estos sean volátiles. De igual manera, se minimizaron las trazas de etanol que ingresan al flash para conseguir una buena pureza de agua, incrementando por lo tanto la pureza de etanol.

Tabla 5. Purezas molares de los productos

	$[BMIM][BF_4]$	$[EMIM][EtSO_4]$
Etanol	0.9986	0.9996
Agua	0.9909	0.9903
IL	0.9913	0.9900

En la Figura 8 se muestra el perfil de composición de la columna extractiva utilizando $[EMIM][EtSO_4]$ como acarreador. En la literatura no se encuentran perfiles de composiciones de un diseño de destilación extractiva convencional para compararlos con este líquido iónico. Se observa trabajo de separación en los perfiles de etanol y agua entre la etapa de alimentación del IL y la etapa de alimentación de la mezcla etanol-agua. El perfil de composición de etanol muestra que se alcanza la pureza requerida desde la etapa 3.

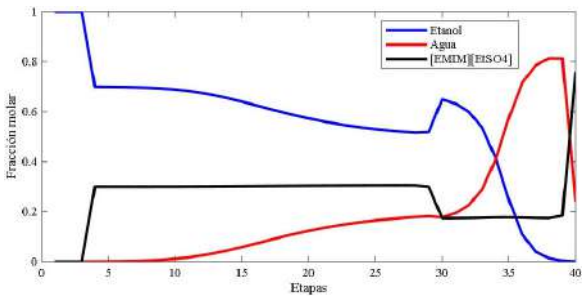


Figura 8. Perfil de composiciones con $[EMIM][EtSO_4]$, columna extractiva

Zhu et al. (2016) reportaron un diseño de ED con $[BMIM][BF_4]$; el número de etapas es 40, considerando la etapa de alimentación del solvente en la 6 y la etapa de alimentación en la 36, la relación $S/F = 0{,}55$ y una relación de reflujo igual a 2.

En la Figura 9 se muestra el perfil de composiciones de la columna extractiva utilizando $[BMIM][BF_4]$ como acarreador. Se compara contra un perfil de un diseño de la literatura Zhu et al. (2016), el cual tiene el mismo número de etapas. Los perfiles de etanol y IL de este trabajo se cruzan entre la etapa de alimentación del IL, a diferencia de la literatura, lo cual podría indicar un menor desempeño en el trabajo de separación; sin embargo, en el diseño de este trabajo, el etanol alcanza una alta pureza antes que la literatura. En el diseño de esta investigación se observan efectos de remezclado en la etapa 34 de la columna extractiva, con lo cual se podría proponer un nuevo diseño en el que se elimine este fenómeno en un trabajo futuro.

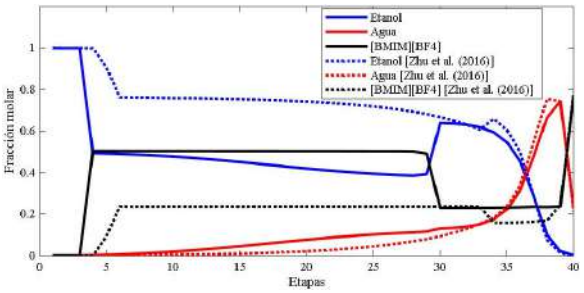


Figura 9. Perfil de composiciones con $[BMIM][BF_4]$, columna extractiva

3.3 Índices de sostenibilidad

Se obtuvieron las emisiones de CO_2, el TAC de la columna extractiva y la energía requerida en MJ/kg de etanol producido para el rehervidor de los sistemas de ED con los dos IL, como se observa en la Tabla 6. Si los resultados se comparan con el diseño óptimo de Zhu et al. (2016), en el cual se reporta un gasto energético para el rehervidor de 2.7 MJ/kg de etanol producido al utilizar $[BMIM][BF_4]$ como acarreador, se obtiene un ahorro del 6.29 % con $[EMIM][EtSO_4]$ y 33.33 % con $[BMIM][BF_4]$, en los diseños de este trabajo.

Tabla 6. Índices de sostenibilidad para destilación extractiva con IL

	$[BMIM][BF_4]$	$[EMIM][EtSO_4]$
$[CO_2]_{Emiss}$ [ton/h]	0.6891	0.7243
TAC [dólares]	591,806.74	641,123.97
Q_R [MJ/kg etanol]	1.80	2.53

4. CONCLUSIONES

Se evaluó el efecto de los líquidos iónicos $[EMIM]$ $[EtSO_4]$, $[BMIM]$ $[BF_4]$, $[BMIM]$ $[Cl]$ y $[BMIM]$ $[MSO_4]$ en la mezcla etanol-agua, donde se observa que la volatilidad relativa se incrementa y se rompe el azeótropo formado por esta mezcla, demostrando que el $[BMIM]$ $[MSO_4]$ y el $[EMIM]$ $[EtSO_4]$ son los que abren mejor la curva de equilibrio, incrementándose la volatilidad relativa. Se seleccionaron los IL: $[EMIM]$ $[EtSO_4]$ y $[BMIM]$ $[BF_4]$ para realizar la simulación en estado estacionario, considerando como base los diseños de la literatura para la columna de destilación extractiva. Se consiguieron purezas molares mayores a 0.99 para todos los productos, considerando que para que el etanol sea un carburante, se requieren valores en la composición molar de esta magnitud. Al mismo tiempo se estimaron ahorros en energía de la separación de hasta 33.33 % respecto a diseños reportados por otros autores de la literatura. Asimismo, los índices de sostenibilidad como las emisiones de CO2 calculados son competitivos con respecto al uso de otros acarreadores, en especial los glicoles. En el perfil de composición de $[BMIM]$ $[BF_4]$ se observaron efectos de remezclado, los cuales generan que la energía de separación se incremente, por lo que se puede proponer en un trabajo futuro, la optimización del diseño que elimine este fenómeno. Con estos resultados se

demuestra que los IL son una alternativa sostenible para la deshidratación de etanol.

REFERENCIAS

Biegler, L.T., Grossmann, I.E., and Westerberg, A.W. (1997). *Systematic methods of chemical process design*. Prentice Hall PTR.

Calvar, N., González, B., Gómez, E., and Domínguez, (2006). Vaporliquid equilibria for the ternary system ethanol + water + 1-butyl-3-methylimidazolium chloride and the corresponding binary systems at 101.3 kpa. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 51(6), 2178–2181. doi:10.1021/je060293x.

Calvar, N., González, B., Gómez, E., and Domínguez, (2008). Vapor–liquid equilibria for the ternary system ethanol + water + 1-ethyl-3-methylimidazolium ethylsulfate and the corresponding binary systems containing the ionic liquid at 101.3 kpa. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 53(3), 820–825. doi:10.1021/je700710d.

Calvar, N., González, B., Gómez, E., and Domínguez, (2009). Vaporliquid equilibria for the ternary system ethanol + water + 1-butyl-3-methylimidazolium methylsulfate and the corresponding binary systems at 101.3 kpa. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 54(3), 1004–1008. doi:10.1021/je800828y.

Calvar, N., González, B., Gómez, E., and Domínguez, A. (2007). Study of the behaviour of the azeotropic mixture ethanol–water with imidazolium-based ionic liquids. *Fluid Phase Equilibria*, 259, 51–56. doi:10.1016/j.fluid.2007.03.021.

Faghihi, E., Mokhtarani, B., Mortaheb, H.R., Heydar, K.T., Mirzaei, M., and Sharifi, A. (2020). Vapor liquid equilibria for ionic liquid/ethanol/water systems and the effect of anion hydrolysis. *Chemical Engineering & Technology*, 43(11), 2277–2285. doi:https://doi.org/10.1002/ceat.202000114.

Frolkova, A. and Raeva, V. (2010). Bioethanol dehydration: State of the art. *Theor Found Chem Eng*, 44, 545–556. doi:10.1134/S0040579510040342.

Gadalla, M.A., Olujic, Z., Jansens, P.J., Jobson, M., and Smith, R. (2005). Reducing co2 emissions and energy consumption of heat-integrated distillation systems. *Environmental Science & Technology*, 39(17), 6860–6870. doi:10.1021/es049795q.

Ge, Y., Zhang, L., Yuan, X., Geng, W., and Ji, J. (2008). Selection of ionic liquids as entrainers for separation of (water+ethanol). *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 40(8), 1248–1252. doi:10.1016/j.jct.2008.03.016.

Gutiérrez-Guerra, R., Segovia-Hernández, J.G., and Hernández, S. (2009). Reducing energy consumption and co2 emissions in extractive distillation. *Chemical Engineering Research and Design*, 87(2), 145–152. doi:https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.07.004.

Jiang, X.C., Wang, J.F., Li, C.X., Wang, L.M., and Wang, Z.H. (2007). Vapour pressure measurement for binary and ternary systems containing water methanol ethanol and an ionic liquid 1-ethyl-3-ethylimidazolium diethylphosphate. *Journal of Chemical Thermodynamics - J CHEM THERMODYN*, 39, 841–846. doi:10.1016/j.jct.2006.11.013.

Long, N.V.D. and Lee, M. (2012). Improvement of the deethanizing and depropanizing fractionation steps in ngl recovery process using dividing wall column. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 45, 285–294.

Pereiro, A., Araújo, J., Esperança, J., Marrucho, I., and Rebelo, L. (2012). Ionic liquids in separations of azeotropic systems – a review. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 46, 2–28. doi:10.1016/j.jct.2011.05.026. Thermodynamics of Sustainable Processes.

Quijada-Maldonado, E., Meindersma, G.W., and de Haan, A.B. (2014). Ionic liquid effects on mass transfer efficiency in extractive distillation of water–ethanol mixtures. *Computers & Chemical Engineering*, 71, 210–219. doi:10.1016/j.compchemeng.2014.08.002.

Ramírez-Corona, N., Ek, N., and Jiménez-Gutiérrez, A. (2015). A method for the design of distillation systems aided by ionic liquids. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 87, 1–8. doi:10.1016/j.cep.2014.10.016.

Simoni, L., Lin, Y., Brennecke, J., and Stadtherr, M. (2007). Modeling liquid-liquid equilibrium of ionic liquid systems with nrtl, electrolyte-nrtl, and uniquac. *Industrial & Engineering Chemistry Research - IND ENG CHEM RES*, 47. doi:10.1021/ie070956j.

Tututi, S., Jiménez, A., and Hahn, J. (2014). Control analysis of an extractive dividing-wall column used for ethanol dehydration. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 82, 88–100. doi:10.1016/j.cep.2014.05.005.

Wang, J., Li, C.X., and Wang, Z. (2007a). Measurement and prediction of vapor pressure of binary and ternary systems containing 1ethyl3-methylimidazolium ethyl sulfate. *Journal of Chemical and Engineering Data - J CHEM ENG DATA*, 52, 1307–1312. doi:10.1021/je700038w.

Wang, J.F., Li, C.X., Wang, Z.H., Li, Z.J., and Jiang, Y.B. (2007b). Vapor pressure measurement for water, methanol, ethanol, and their binary mixtures in the presence of an ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium dimethylphosphate. *Fluid Phase Equilibria*, 255, 186–192. doi:10.1016/j.fluid.2007.04.010.

Zhao, J., Dong, C.C., Li, C.X., Meng, H., and Wang, Z.H. (2006). Isobaric vapor–liquid equilibria for ethanol–water system containing different ionic liquids at atmospheric pressure. *Fluid Phase Equilibria*, 242(2), 147–153. doi:10.1016/j.fluid.2006.01.023.

Zhu, Z., Ri, Y., Li, M., Jia, H., Wang, Y., and Wang, Y. (2016). Extractive distillation for ethanol dehydration using imidazolium-based ionic liquids as solvents. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 109, 190–198. doi:10.1016/j.cep.2016.09.009.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Metabolic Biomarkers for Classification of Type 2 Diabetes Using Machine Learning

Pablo Alonso Rodriguez [*] **Juan José Oropeza Valdez** [**]
María Fernanda Romo-García [***] **Carlos E. Galván-Tejada** [*]
Jorge I. Galván-Tejada [*] **Valeria Maeda-Gutiérrez** [*]

[*] *Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Jardín Juárez, Centro, Zacatecas 98000, México. (e-mail: pablo.alonso.rodriguez@uaz.edu.mx, ericgalvan@uaz.edu.mx, gatejo@uaz.edu.mx, valeria.maeda@uaz.edu.mx)*
[**] *Centro de Ciencias de la Complejidad, Universidad Autónoma Nacional de México (UNAM). México City, México. (e-mail: juan.oropeza@c3.unam.mx)*
[***] *Unidad Académica de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus UAZ Siglo XXI, Carretera Zacatecas-Guadalajara km 6, Col. Ejido La Escondida, Zacatecas 98160 México. (e-mail: mromog@cinvestav.mx)*

Abstract: Four machine learning algorithms were compared to classify type 2 diabetes using six metabolite families from a public study. The models demonstrated notable predictive capability. Notably, the Random Forest algorithm achieved perfect classification (AUC=1.0) with the organic acids and carbohydrates (M3) and lipids (M6) families. Interpretability analysis SHapley Additive exPlanations identified key metabolites consistent with the pathophysiology of T2D. The study validates the high potential of metabolomics for accurate diagnosis of T2D, revealing biological signals of interest in specific classes of metabolites.

Keywords: Type 2 diabetes, Metabolomics, Machine Learning, Classification, Biomarkers, SHAP

1. INTRODUCTION

Diabetes mellitus (DM) is a chronic disease characterized by high blood glucose levels that can lead to both macrovascular and microvascular complications. It also represents a significant public health problem at the global, regional, and local levels Peñafiel (2024). One of its main forms is type 2 diabetes (T2D), which begins with insulin resistance, a condition in which cells do not respond adequately to insulin. As the disease progresses, a lack of insulin may also develop Kumar et al. (2020). At present, 589 million adults aged 20 to 79 live with diabetes worldwide. In 2024, diabetes was responsible for approximately 3.4 million deaths worldwide. In addition, this disease has generated healthcare costs exceeding one trillion dollars, representing a 338% increase compared to the last 17 years. IDF (2024). For this reason, it is essential to advance in the development of early diagnostic methods and in the understanding of the pathophysiological mechanisms of the disease, as both aspects are key to improving prognosis and designing effective therapeutic interventions. In this regard, metabolomic analysis has established itself as a valuable tool, as it provides a comprehensive overview of an organism's physiological state. Its application is handy in the discovery of biomarkers and the identification of alterations in metabolic pathways associated with various diseases, including diabetes Ma et al. (2025). Studies such as Jin and Ma (2021) have demonstrated that metabolomics enables a more comprehensive characterization of the mechanisms underlying diabetes and its progression. Its application in epidemiological research has led to the identification of new biomarkers associated with T2D, including branched-chain amino acids, metabolites derived from phenylalanine, and compounds involved in energy metabolism and lipid metabolism. Additionally, it is worth noting that metabolomics has been utilized to investigate metabolic pathways that may be modulated by pharmacological treatments. The availability of high-quality public data, such as that reported by Ma et al. (2025), which provides a detailed metabolomic profile of a cohort of 300 individuals, advanced computational methods can be applied to validate and further explore existing findings. This dataset categorizes metabolites into six primary families, enabling systematic analysis based on chemical classes. The objective of the present study is to compare different Machine Learning (ML) algorithms in order to independently evaluate the predictive power of each of these six metabolite families. Through the training and validation of multiple models, we aim to identify the group of metabolites that allows for better discrimination between healthy individuals and those with T2D, as well as to determine the individual metabolites with the greatest influence within the family that exhibit the highest predictive performance. Although numerous metabolomic studies have identified metabolic biomarkers for T2D, few have systematically compared multiple ML

models applied to different families of metabolites, incorporating interpretability techniques based on SHapley Additive exPlanations (SHAP).

2. METHODOLOGY

The methodological workflow, from data preparation to model interpretability, is illustrated in Fig. 1.

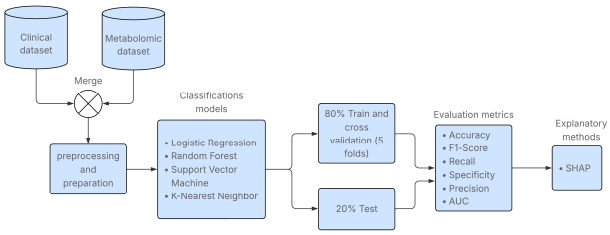


Fig. 1. Workflow of the Proposed Methodology.

All models were implemented in a Google Colab environment running Python 3.12.2. The primary libraries used for the analysis were: pandas: 2.2.2, scikit-learn: 1.6.1, numpy: 2.0.2, numpy: 2.0.2, matplotlib: 3.10.0, shap: 0.48.0 and upsetplot: 0.9.0

To ensure the reproducibility of the analysis, the models were implemented using mainly the default hyperparameters from the scikit-learn library. The only parameters that were modified were max_iter = 1000 in logistic regression to ensure model convergence, and the kernel in SVM to specify the use of a radial basis function (rbf) kernel. The code is available on GitHub: `https://github.com/AdrianAlons0/Metabolomic-analysis`

2.1 Data acquisition and preparation

The dataset used in this study was obtained from the open-access article by Ma et al. (2025). The original study profiled serum metabolic biosignatures in a cohort of 300 individuals from northern China, comprising 200 healthy controls and 100 patients with newly diagnosed T2D. The data were generated using a metabolomics platform driven by ultra-high-performance liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS). The dataset quantifies a total of 1,609 metabolites, which are organized into six main families from M1 to M6 corresponding to the sheets in the original data file: M1: Amino acids and nucleosides, M2: Bile acids and fatty acids, M3: Organic acids and carbohydrates, M4: Bacteria-derived metabolites, M5: Acylcarnitines and lysophospholipids, and M6: Lipids.

2.2 Dataset Preprocessing

The two data files (a clinical Excel with patient ID and diagnosis, and a metabolomic Excel with six sheets per family) were processed for each of the six families. The process involved loading and transposing the metabolomic data (metabolites as columns, patients as rows), and merging them with the clinical data using the sample ID . Duplicate rows and samples with missing data were eliminated, and concentrations were converted to numerical format. Metabolite concentrations were defined as the predictor variables (X) and the binary diagnosis (1=disease, 0=healthy) as the target variable (y). Finally, the dataset was split into 80% training and 20% test sets (using a fixed seed), and features were normalized using StandardScaler. A Stratified K-Fold cross-validation strategy (5-folds) was employed on the training set to preserve class distribution.

2.3 Modeling and evaluation

Four classification algorithms were evaluated:

Logistic Regression (LR): a supervised learning algorithm used in binary classification tasks. Its objective is to model the relationship between a set of independent variables and a categorical dependent variable, using the logistic or sigmoid function Maisueche Cuadrado et al. (2019). In this case, the model was configured with a binomial family to serve as a classifier.

Random Forest (RF): a joint learning method that generates multiple decision trees and combines their predictions in order to improve classification accuracy and minimize overfitting Agundis Martínez (2023). Each tree is trained from random subsets of features, which contributes to the robustness of the model.

Support Vector Machine (SVM): a discriminative classifier that searches for the optimal hyperplane capable of maximizing the separation between classes within an N-dimensional feature space, where N is the number of independent variables Maisueche Cuadrado et al. (2019). For this model, a radial basis function (RBF) kernel was used, which improves the delimitation between classes when the data are not linearly separable.

K-Nearest Neighbors (KNN): a non-parametric classification algorithm that assigns a class to a new instance based on the majority of classes present among its k nearest neighbors. The value of the hyperparameter k defines how many neighbors are taken into account to make the prediction Maisueche Cuadrado et al. (2019).

For each model, stratified cross-validation with 5 folds was performed on the training set, and the training average and its standard deviation were evaluated to assess the models' ability to learn classification. After cross-validation, each model was trained with the complete training set, and its performance was evaluated on the test set. Both sets (training and test) were evaluated using the following metrics:
Accuracy: evaluates the overall accuracy of the model's predictions by calculating the proportion of correctly classified instances comprising both true positives and true negatives relative to the total number of observations.as can be seen in the equation 1

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{1}$$

where: True positives (TP): correctly classified diabetic cases; True negatives (TN): correctly classified non-

diabetic cases; False positives (FP): non-diabetic cases misclassified as diabetic; False negatives (FN): diabetic cases misclassified as non-diabetic.

F1-score: represents the harmonic mean between precision and sensitivity, which means that it penalizes unbalanced values in either of them. This metric is not symmetric with respect to classes, since its result varies depending on which is considered a positive or negative class. It is calculated as follows: Hicks et al. (2022)

$$F_1 = 2 \times \frac{\text{Precisión} \times \text{Recall}}{\text{Precisión} + \text{Recall}} \tag{2}$$

Recall: also known as sensitivity, represents the proportion of positive samples that were correctly identified. It is calculated as the ratio between the number of correctly classified positive samples and the total number of samples that were assigned to the positive class Hicks et al. (2022). A high recall indicates that the model correctly detects positive cases.

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \tag{3}$$

Specificity: indicates the proportion of negative samples that have been correctly classified. It is determined as the ratio between the number of true negatives and the total number of samples belonging to the negative class Hicks et al. (2022).

$$\text{Specificity} = \frac{TN}{TN + FP} \tag{4}$$

Precision: is defined as the proportion of true positives relative to the total number of positive predictions made by the model. In other words, it indicates how reliable the model's positive predictions are, i.e., how many of the units that were classified as positive actually are positive Grandini et al. (2020).

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \tag{5}$$

Receiver operating characteristic (ROC Curve): The ROC curve is a statistical tool used to analyze the discriminatory power of a binary diagnostic test. It represents the relationship between sensitivity and the false positive rate (i.e., one minus specificity) across various decision thresholds. This type of curve is useful for determining the optimal cutoff point for a test, evaluating its overall performance, and comparing the discriminatory effectiveness of different diagnostic tests Martínez Pérez and Pérez Martin (2023).

Area under the curve (AUC): measures the overall performance of the ROC curve, representing the probability that the model will correctly classify randomly chosen positive cases over randomly chosen negative cases Borja-Robalino et al. (2020).
AUC = 0: the model classifies completely incorrectly, worse than if it were done randomly.

AUC = 0.5: the model is unable to distinguish between classes; its performance is equivalent to guessing randomly.

AUC = 1: the model distinguishes perfectly between classes, showing ideal discriminatory ability.

2.4 Model interpretability

To understand the contribution of each metabolite to the prediction, SHAP explainability technique was applied, calculating SHAP values on the test set. Beeswarm summary graphs were generated showing the relative influence of the most important metabolites on the classification. SHAP has established itself as a widely used methodology for interpreting predictions generated by ML models, as it is based on principles of game theory Kuhn and Tucker (1953) Within the field of explainable artificial intelligence (XAI), this approach uses numerical values to estimate the relative importance of input variables in a specific prediction. It is a model-agnostic method, as it only requires knowledge of the black box model output for instances neighboring the analyzed sample. In the case of SHAP, each observed value of a feature is assigned a SHAP value, allowing for the individual contribution of that feature to the model output to be interpreted. The analysis focuses on understanding the local factors that influence the model's decision Baptista et al. (2022). Additionally, an upset plot was used to visualize the intersection of the most important metabolites identified by the different models, highlighting consistently predictive characteristics.

3. RESULTS

3.1 Predictive performance for each family

The LR, RF, SVM, and KNN classification algorithms were trained and evaluated for each of the six metabolite families. Table 1 summarizes the predictive performance of the most prominent models, presenting the key classification metrics obtained in the test set: Accuracy, F1-Score, Recall, Specificity, Precision, and AUC. For a robust reference of performance during training, the average AUC and its standard deviation from stratified cross-validation (5-folds) performed on the training set are also included.

Table 1. Predictive Performance of Classification Models in the Test Set and Cross-Validation for the Detection of T2D, by Metabolite Family.

Family	Model	AUC (Train)	Accuracy (Test)	F1-Score (Test)	Recall (Test)	Specificity (Test)	Precision (Test)	AUC (Test)
M1	SVM	0.9832	0.9153	0.8485	0.7778	0.9756	0.9333	0.9905
	RF	0.9805	0.9153	0.8485	0.7788	0.9756	0.9333	0.9756
M2	LR	0.9655	0.9512	0.8333	0.8333	0.9714	0.8333	0.9905
	RF	0.9090	0.9756	0.9091	0.8333	1	1	0.9500
M3	RF	0.9916	1	1	1	1	1	1
	LR	0.9829	0.9592	0.8889	0.8000	1	1	1
M4	RF	0.9911	0.9000	0.8125	0.7647	0.9535	0.8667	0.9631
	SVM	0.9819	0.9167	0.8485	0.8235	0.9535	0.8750	0.9549
M5	LR	0.9705	0.9333	0.8750	0.8235	0.9767	0.9333	0.9836
	RF	0.9282	0.8667	0.7333	0.6471	0.9535	0.8462	0.9300
M6	RF	0.9994	1	1	1	1	1	1
	SVM	0.9966	0.8833	0.7407	0.5882	1	1	0.9945

The results in Table 1 demonstrate the high predictive capacity of metabolite families for T2D classification. Noteworthy is the perfect performance in AUC = 1 achieved

Table 2. Top 10 metabolites per metabolite family.

	Metabolite family		
	M1	M2	M3
Metabolite name (top 10)	S-Adenosylhomocystein	FF(19:0)	D-Glucose
	Cysteic acid	FFA(21:0)	D-Mannose
	Valine	FFA(22:0)	Fumaric acid
	Homo-L-Arg	FFA(24:1n9)	D-Gluconic acid
	Aminoadipic acid	FFA(23:0)	2-Hydroxybutyric acid
	Cystine	FFA(12:0)-3-OH	(R)-3-Hydroxyisobutyric acid
	Histidine	FFA(22:3)-isomer-2	Oxoadipic acid
	1-Methyladenosine	FFA(12:0)	L-Lactic acid
	Glutamic acid	FFA(13:0)	Glycolate
	Xanthine	FFA(22:3)-isomer-1	2-Hyxyadipic acid
	M4	M5	M6
	Stearoylethanolamide	AcCa(16:0-OH))	PC(41:6)
	Ascorbic acid	AcCA(18:0)-OH)	LCER(24:1)
	Dopa	AcCa(3:0-DC)	PC(40:5)
	Sphinganine-1-phosphate	AcCa(14:0-OH)	TAG(56:7-20:3)
	3-Hydroxypropionic acid	Lysopl(18:0/0:0)	PC(38:2)
	Sphinganine 1-phosphate	LysoPA(18:1/0:0)	TAG(51:1-18:0)
	Putrescine	Lysopl(0:0/20:4)	TAG(52:7-16:0)
	Sphingosine-1-phosphate	LysoPC(18:0/0:0)	PC(42:6)
	Indole-3-carboxaldehyde	AcCa(4:0-DC)	TAG(48:1-18:0)
	5-Methoxyindoleacetate	LysoPC(18:1/0:0)	TAG(52:4-18:0)

by the RF model in both the M3 family (Organic Acids and Carbohydrates) and the M6 family (Lipids) in the test set, with metrics of Accuracy, F1-score, Recall, Specificity, and Precision also equal to 1. This suggests that these two families contain exceptionally discriminatory metabolic biomarkers.

Other families also showed very robust predictive performance: In M1, the Amino Acids and Nucleosides family, the SVM algorithm achieved an AUC of 0.9905. In the M2 family of Bile and Fatty Acids, the LR and RF algorithms obtained AUC values of 0.9905 and 0.9500, respectively. For the M5 family concerning Acylcarnitines and Lysophospholipids, the LR algorithm achieved an AUC of 0.9836. Finally, the M4 family (Bacteria-Derived Metabolites), although with values slightly below the maximum, maintained solid performance with the RF algorithm AUC of 0.9631.

3.2 Identification of Key Metabolites

To identify the most influential metabolites, SHAP values were calculated for the best-performing models in each family. These can be seen in the table 2, which shows the top 10 metabolites, quantifying their contribution to the prediction of T2D.

In family M1, the main metabolites identified were amino acids and nucleosides. The metabolites with the highest importance values included S-adenosylhomocystein, cysteic acid, valine, homo-L-arginine, and aminoadipic acid, along with cystine, histidine, 1-methyladenosine, glutamic acid, and xanthine.

Family M2 consisted mainly of free fatty acids of medium and long chains. The most important metabolites according to SHAP values were FF(19:0), FFA(21:0), FFA(22:0), FFA(24:1n9), and FFA(23:0), as well as other variants such as FFA(12:0)-3-OH, FFA(22:3)-isomer-2, FFA(12:0), FFA(13:0), and FFA(22:3)-isomer-1.

In family M3, the most relevant metabolites were associated with carbohydrates and organic acids. The top ten metabolites were D-glucose, D-mannose, fumaric acid, D-gluconic acid, 2-hydroxybutyric acid, (R)-3-hydroxyisobutyric acid, oxoadipic acid, lactic acid, glycolate, and 2-hydroxyadipic acid.

Family M4, which includes bacteria-derived metabolites, showed the highest SHAP values for stearoylethanolamide, ascorbic acid, dopa, sphinganine-1-phosphate, 3-hydroxypropionic acid, sphinganine 1-phosphate, putrescine, sphingosine-1-phosphate, indole-3-carboxaldehyde, and 5-methoxyindoleacetate.

In family M5, the most important metabolites corresponded mainly to acyl carnitines and lysophospholipid intermediates, including AcCa(16:0-OH), AcCa(18:0-OH), AcCa(3:0-DC), AcCa(14:0-OH), Lysopl(18:0/0:0), LysoPA(18:1/0:0), Lysopl(0:0/20:4), LysoPC(18:0/0:0), AcCa(4:0-DC), and LysoPC(18:1/0:0).

Finally, family M6 included complex lipid metabolites. The most relevant compounds were PC(41:6), LCER(24:1), PC(40:5), TAG(56:7-20:3), PC(38:2), TAG(51:1-18:0), TAG(52:7-16:0), PC(42:6), TAG(48:1-18:0), and TAG(52:4-18:0).

3.3 Metabolite Intersections

This subsection presents upset plots for each group of metabolites, highlighting the intersections of the most influential metabolites in each family. The vertical bars on the left indicate the number of main metabolites unique to each model, while the horizontal bars at the bottom show the size of the intersections between sets, highlighting

the shared metabolites that have the greatest influence within each family. These plots show the intersections of the top 10 metabolites identified by SHAP analysis of the four models (KNN, SVM, RF, LR) for each family. This approach allows for a direct comparison of consistency and divergence in metabolite importance.

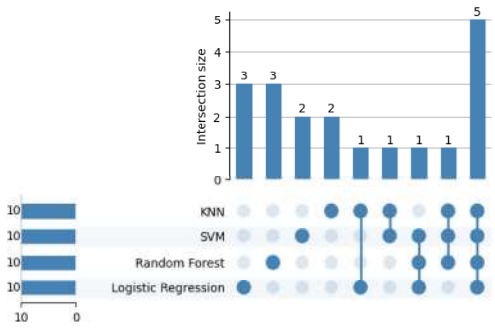


Fig. 2. Upset plot for M1 family.

For the M1 metabolite family (Fig. 2), principal feature analysis reveals a robust consensus core among the four models evaluated. The most significant intersection consists of 5 features identified simultaneously by all models (LR, RF, SVM, and KNN). Additionally, several smaller intersections were observed between subgroups of models, such as the two combinations of three algorithms (SVM-RF-LR and KNN-SVM-RF) that shared 1 unique feature in each case. In terms of the unique features of each algorithm, LR and RF showed the highest number of exclusive elements, with three each, while SVM and KNN identified two features, respectively

Similarly, the analysis for the M2 family (Fig. 3) also shows significant overlap in the features selected by the models. In this case, the main intersection shared by the four algorithms (LR, RF, SVM, and KNN) consists of three features. There is also an intersection of two exclusive features between the KNN, SVM, and RF models. In terms of unique elements, LR was the model that identified the highest number of exclusive features with 4, followed by RF and KNN with 3 each. In contrast, SVM only identified 1 unique feature.

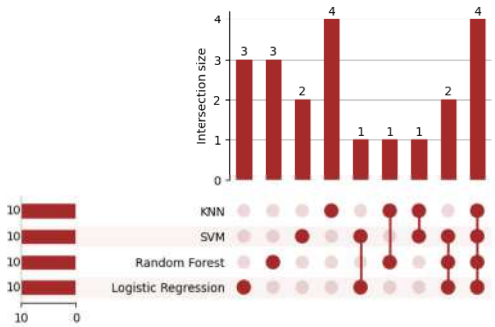


Fig. 3. Upset plot for M2 family.

For the set of metabolites M3 (Fig. 4), the trend of strong central consensus is maintained. The main intersection, shared unanimously by the four models (LR, RF, SVM, and KNN), contains five characteristics. Additionally, two exclusive intersections of 2 features each were identified, corresponding to the SVM-LR and KNN-RF model pairs. Regarding the unique elements of each algorithm, LR contributed the highest number of exclusive features with 3, followed by RF with 2. Finally, the SVM and KNN models contributed 1 unique feature each.

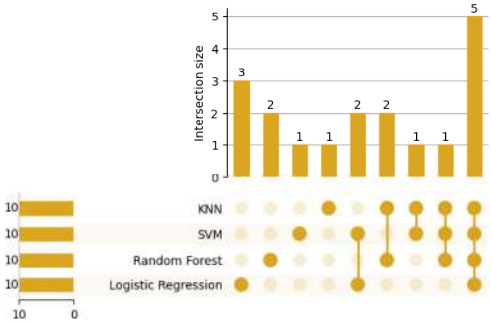


Fig. 4. Upset plot for M3 family.

The analysis of the M4 family, Fig. 5 revealed a feature selection pattern with a main intersection of six features unanimously identified by the four models (LR, RF, SVM, and KNN). This intersection represents the core set of features most relevant to this metabolite family, according to the models evaluated. In addition to the main intersection, other smaller clusters were identified. An intersection of three exclusive features shared by the KNN, SVM, and RF models was observed. The SVM and LR models shared a single feature. In terms of unique features, the LR model selected the largest number of exclusive elements, with a total of three features. The RF and KNN models each identified a single feature, while the SVM model did not identify any exclusive features.

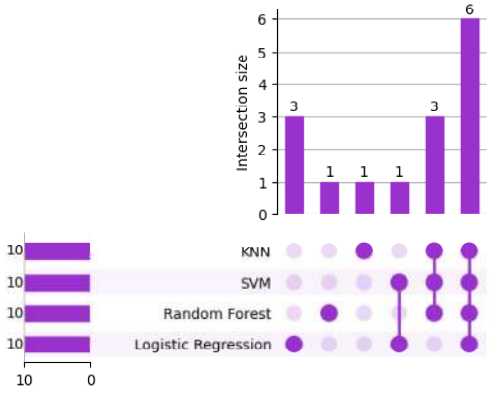


Fig. 5. Upset plot for M4 family.

For the M5 metabolite family (Fig. 6), analysis of the upset plot revealed a high degree of overlap between the features

selected by the models. The main intersection, which includes all four models (LR, RF, SVM, and KNN), consists of three features that represent the most robust set of elements for this family. In addition, multiple intersections between subgroups of models were observed. Specifically, an overlap of two features was identified between the KNN and SVM models. On the other hand, three intersections of a single feature were found between the following model combinations: (LR, RF), (SVM, LR), and (KNN, RF). In the intersections of three models, one feature was observed in each case between the combinations (SVM, RF, LR), (KNN, SVM, LR), and (KNN, SVM, RF).

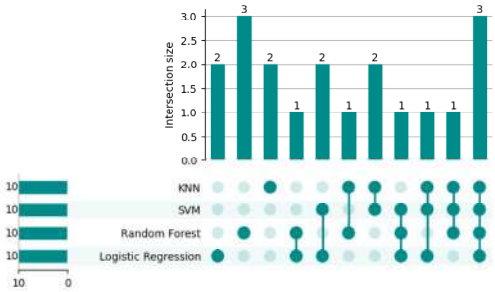


Fig. 6. Upset plot for M5 family.

In terms of unique features, the RF model identified the highest number, with a total of three exclusive elements, followed by LR and KNN with two unique features each. The SVM model did not identify any features that were exclusive to this algorithm.

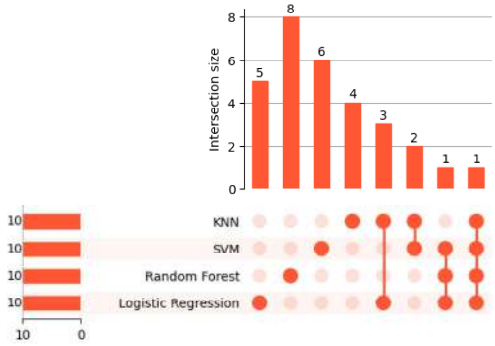


Fig. 7. Upset plot for M6 family.

Analysis of the M6 metabolite family (Fig. 7) revealed a feature selection pattern with a main intersection of a single feature shared by all four models (LR, RF, SVM, and KNN). This element represents a consensus among the algorithms on a fundamental feature for this metabolite family. In terms of subgroup intersections, several important connections were observed. The KNN and LR models shared three features. The KNN and SVM models shared two features, while the SVM, RF, and LR models had an intersection of one feature. In terms of unique features, the RF model selected the highest number with a total of 8 exclusive elements. It was followed by the SVM models with 6, LR with 5, and KNN with 4 unique features.

4. DISCUSSION

A key finding of this study is the extraordinary discriminatory power of metabolomic signatures for T2D classification. This result is consistent with studies such as Fernandes Silva and Laakso (2025) and Chen and Gerszten (2020), which indicate metabolomics provides a functional readout of an organism's physiological state, offering a more powerful biomarker tool than traditional clinical measurements. This capability was demonstrated by the near-perfect classification performance achieved in multiple metabolite families. Notably, the RF model achieved ideal discrimination for the M3 and M6 families, while M1, M2, and M5 also generated models of outstanding robustness.

This performance surpasses conventional clinical risk models, such as Butt et al. (2021) (which achieved 86.6% accuracy), and highlights metabolomics' potential to capture the profound systemic dysregulation characterizing T2D.

Model success validates our hypothesis that different metabolite classes harbor unique, powerful disease signatures. While biomarker discovery often yields imperfect AUCs (e.g., 0.6-0.76) due to population overlap SARI and FADILAH (2025), achieving an AUC of 1.0 in two families suggests the T2D metabolic signatures in this cohort are marked and definitive, not subtle. This implies the transition to T2D is a profound, unambiguous systemic change. This strengthens the argument for metabolomic diagnostics that could offer binary clarity (yes/no) rather than a probabilistic risk score, representing a major clinical advance.

The predictive performance of the M3 and M6 families reinforces carbohydrate and lipid metabolism dysregulation as the central axis of T2D pathophysiology, doing so with unprecedented quantitative clarity. Analysis of influential metabolites points beyond simple hyperglycemia and dyslipidemia toward more complex cellular processes.

4.1 Organic Acids and Carbohydrates, M3 family

The M3 family's performance validates our approach and reveals insights into cellular energy dysfunction in T2D. As expected, SHAP analysis confirmed biological plausibility, identifying D-glucose and fumaric acid as the most important predictors. This aligns with studies like Pinti et al. (2019), which describe TCA cycle metabolite accumulation as an indicator of mitochondrial stress or electron transport chain disruption—conditions frequently observed in insulin resistance.

4.2 Lipids, M6 family and Bile Acids and Fatty Acids, M2 family

The classification achieved with the M6 family (RF AUC=1.0), complemented by the robust performance of M2 (LR AUC=0.99), reflects the atherogenic dyslipidemia profile of T2D. SHAP analysis identified highly influential triacylglycerols (TAGs) and phospholipids (e.g., PA(20:0/18:2)) from M6, and several free fatty acids

(FFAs) and conjugated bile acids (e.g., TLCA-3S, TCDCA-3S) from M2. These results correlate with the established literature, as T2D is characterized by an atherogenic triad (elevated triglycerides, low HDL, small/dense LDL) driven by insulin resistance Krauss (2004). The specific TAGs and FFAs identified are direct components of this pathological process Carmena (2008). The models learned this complex signature; the importance of specific species like TAG(53:4-20:4) suggests they are identifying the precise molecular composition of the diabetic state, not just general dyslipidemia.

4.3 Acylcarnitines and Lysophospholipids, M5 family

This family demonstrated strong predictive power (LR model AUC 0.9836). SHAP analysis consistently revealed that elevated levels of numerous lysophospholipid species, especially lysophosphatidylcholines (LysoPCs) like $LysoPC(18:0/0:0)$ and $LysoPC(16:0/0:0)$, are strongly associated with T2D. This finding aligns with the role of M5 metabolites in inefficient fatty acid oxidation, a known mechanism for lipotoxicity and insulin resistance Schooneman et al. (2013). The literature on M5 lysophospholipids is complex; some studies report a reduction in circulating LysoPCs in T2D Barber et al. (2012), while others link different species to increased risk Lu et al. (2016). Our findings of a strong positive association for specific LysoPCs ($LysoPC(18:0)$ and $LysoPC(16:0)$) add a crucial layer of detail to this field.

4.4 Amino acids, M1 family and bacteria-derived metabolites, M4 family

Analysis of the M1 and M4 families extends our understanding of T2D, incorporating amino acid dysregulation and the systemic influence of the gut microbiome. Both families showed high predictive power. M1 models (e.g., SVM $AUC = 0.9905$) demonstrated excellent performance; SHAP analysis consistently identified specific M1 metabolites, such as cysteic acid and carnosine, as strong positive contributors, while N-acetyl tyrosine and betaine appeared protective. These findings align with research linking elevated branched-chain and aromatic amino acids with T2D risk Guasch-Ferré et al. (2016). The M4 family's top model (SVM AUC=0.9549) provides convincing, independent evidence of the gut microbiome's contribution to the T2D metabolic phenotype. SHAP identified influential microbial-origin compounds, such as hippuric acid, enterolactone, and indole-3-acrylic acid. The gut microbiome is increasingly recognized as a key environmental factor in T2D, as its metabolites can influence host insulin sensitivity and energy homeostasis Vangipurapu et al. (2020). The model's ability to classify T2D using only this family shows this host-microbiome interaction creates a systemic signature as powerful as the host's own metabolic dysregulation.

4.5 Limitations

Despite the promising results obtained in this study, one of the main limitations that must be considered is the possibility of overfitting in certain models, especially in RF applied to the M3 and M6 families. Both models achieved an AUC of 1.0 in the test set, suggesting exceptional classification ability. However, this ideal performance could also indicate that the models have overlearned the characteristics of the training set, limiting their ability to generalize correctly to new data. Overfitting is a frequent concern in complex models such as RF. Although the models showed outstanding performance on the test set, it is essential that these results be validated with independent datasets to confirm the robustness and generalization of the model in real-world scenarios. Similarly, simpler models, such as LR in the M3 family, showed signs of overfitting on the test set as they also obtained an AUC = 1. This analysis highlights the need to apply stricter regularization strategies in future iterations of the models to mitigate the risk of overfitting and improve generalization.

5. CONCLUSION

This study has demonstrated the high predictive capacity of metabolomic profiles for classifying T2D, using four ML algorithms in six metabolite families. The results highlight that some families, such as M3 (Organic Acids and Carbohydrates) and M6 (Lipids), have particularly strong metabolic signatures for identifying T2D, with RF models achieving an AUC of 1.0. Other families, such as M1 (Amino Acids), M2 (Bile Acids), and M5 (Acylcarnitines), also showed excellent performance with AUC ¿ 0.92. The use of interpretability techniques, such as SHAP, allowed us to identify key metabolites in the different families and highlight associations consistent with the diagnosis of T2D. In addition, Upset diagrams revealed complex patterns in feature selection, showing both consensus and divergence between models. This work validates the potential of ML algorithms in metabolomics for the diagnosis of T2D, underscoring the importance of evaluating different metabolite families to better understand the pathophysiology of the disease. Key metabolites identified in families such as M3 and M6 are promising candidates for future research and the development of early diagnostic tools. Future research could focus on validating these models using independent datasets to assess their generalization ability across different populations. Furthermore, integrating regularization techniques, feature selection techniques, and exploring more complex models could help reduce the risk of overfitting observed in some models, such as RF in the M3 and M6 families.

REFERENCES

Agundis Martínez, A.F. (2023). Evaluación de algoritmo de aprendizaje automático mediante bosques aleatorios para el seguimiento de variables críticas en un proceso de manufactura.

Baptista, M.L., Goebel, K., and Henriques, E.M. (2022). Relation between prognostics predictor evaluation metrics and local interpretability shap values. *Artificial Intelligence*, 306, 103667.

Barber, M.N., Risis, S., Yang, C., Meikle, P.J., Staples, M., Febbraio, M.A., and Bruce, C.R. (2012). Plasma lysophosphatidylcholine levels are reduced in obesity and type 2 diabetes. *PloS one*, 7(7), e41456.

Borja-Robalino, R., Monleón-Getino, A., and Rodellar, J. (2020). Estandarización de métricas de rendimiento para clasificadores machine y deep learning. *Revista*

Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação, (E30), 184–196.

Butt, U.M., Letchmunan, S., Ali, M., Hassan, F.H., Baqir, A., and Sherazi, H.H.R. (2021). Machine learning based diabetes classification and prediction for healthcare applications. *Journal of healthcare engineering*, 2021(1), 9930985.

Carmena, R. (2008). Riesgo elevado de disfunción lipoproteica en la diabetes mellitus tipo 2. *Revista española de cardiología suplementos*, 8(3), 19C–26C.

Chen, Z.Z. and Gerszten, R.E. (2020). Metabolomics and proteomics in type 2 diabetes. *Circulation research*, 126(11), 1613–1627.

Fernandes Silva, L. and Laakso, M. (2025). Advances in metabolomics: A comprehensive review of type 2 diabetes and cardiovascular disease interactions. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(8), 3572.

Grandini, M., Bagli, E., and Visani, G. (2020). Metrics for multi-class classification: an overview. *arXiv preprint arXiv:2008.05756*.

Guasch-Ferré, M., Hruby, A., Toledo, E., Clish, C.B., Martínez-González, M.A., Salas-Salvadó, J., and Hu, F.B. (2016). Metabolomics in prediabetes and diabetes: a systematic review and meta-analysis. *Diabetes care*, 39(5), 833–846.

Hicks, S.A., Strümke, I., Thambawita, V., Hammou, M., Riegler, M.A., Halvorsen, P., and Parasa, S. (2022). On evaluation metrics for medical applications of artificial intelligence. *Scientific reports*, 12(1), 5979.

IDF (2024). International diabetes federation. URL `https://diabetesatlas.org/es`. Accessed on October 6, 2025.

Jin, Q. and Ma, R.C.W. (2021). Metabolomics in diabetes and diabetic complications: insights from epidemiological studies. *Cells*, 10(11), 2832.

Krauss, R.M. (2004). Lipids and lipoproteins in patients with type 2 diabetes. *Diabetes care*, 27(6), 1496–1504.

Kuhn, H.W. and Tucker, A.W. (1953). *Contributions to the Theory of Games*. 28. Princeton University Press.

Kumar, R., Saha, P., Kumar, Y., Sahana, S., Dubey, A., and Prakash, O. (2020). A review on diabetes mellitus: type1 & type2. *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 9(10), 838–850.

Lu, Y., Wang, Y., Ong, C.N., Subramaniam, T., Choi, H.W., Yuan, J.M., Koh, W.P., and Pan, A. (2016). Metabolic signatures and risk of type 2 diabetes in a chinese population: an untargeted metabolomics study using both lc-ms and gc-ms. *Diabetologia*, 59(11), 2349–2359.

Ma, S., Yang, L., Lai, J., Cheng, S., Zhang, Y., Wu, Z., Huang, A., Wei, T., Luo, Q., Wang, M., et al. (2025). In-depth profile of biosignatures for t2dm cohort utilizing an integrated targeted lc-ms platform. *Scientific Data*, 12(1), 377.

Maisueche Cuadrado, A. et al. (2019). Utilización del machine learning en la industria 4.0.

Martínez Pérez, J. and Pérez Martin, P. (2023). La curva roc. *SEMERGEN, Soc. Esp. Med. Rural Gen.(Ed. Impr.)*, e101821–e101821.

Peñafiel, B.D.G. (2024). Factores de riesgo asociados a diabetes mellitus tipo 2. *Revista Científica De Salud Y Desarrollo Humano*, 5(2), 101–115.

Pinti, M.V., Fink, G.K., Hathaway, Q.A., Durr, A.J., Kunovac, A., and Hollander, J.M. (2019). Mitochondrial dysfunction in type 2 diabetes mellitus: an organ-based analysis. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*.

SARI, R. and FADILAH, F. (2025). Machine learning-approaches insights into metabolomics for type 2 diabetes mellitus. *JOURNAL OF PHARMACY AND PHARMACOGNOSY RESEARCH*, 13(s1), S1–S12.

Schooneman, M.G., Vaz, F.M., Houten, S.M., and Soeters, M.R. (2013). Acylcarnitines: reflecting or inflicting insulin resistance? *Diabetes*, 62(1), 1–8.

Vangipurapu, J., Fernandes Silva, L., Kuulasmaa, T., Smith, U., and Laakso, M. (2020). Microbiota-related metabolites and the risk of type 2 diabetes. *Diabetes care*, 43(6), 1319–1325.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Evaluation of the acceptance of a new snack-type product (churros) made from pulque agave flour (*Agave salmiana*)

Lucia E. Mendoza Medina, Areli Flores-Morales, José Eduardo López Camarillo, Gael Vásquez Calva, Astrid A. Torres Fernández

Areli Flores-Morales, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala. Carretera Federal San Martin Texmelucan – Tlaxcala. México, CP 90122. Tel: 2484817246, (e-mail: floresafm@hotmai.com y areli.fm@altiplano.tecnm.mx)*

***Lucia Edith Mendoza Medina,** (e-mail: lucia.mm@altiplano.tecnm.mx)*

***José Eduardo López Camarillo,** (e-mail: eduvar912@gmail.com)*

***Gael Vásquez Calva,** (e-mail: 64314ndr3s@gmail.com)*

***Astrid Ariatna Torres Fernández.** (e-mail: astrid.tf@altiplano.tecnm.mx)*

Abstract: The objective of this study was to evaluate the sensory acceptance of a new snack-type product (baked churros) made from pulque agave flour (*Agave salmiana*). Three treatments were formulated with maguey flour, corn flour, and wheat flour in proportions of (0.5:1:1) mixed with complementary ingredients (water, pepper, garlic, salt). An acceptance test was conducted with 68 consumers, using a 9-point hedonic scale for the attributes of color, aroma, flavor, texture, crunchiness, spiciness, and overall acceptance. The results show an acceptance of 7.9 ± 0.3 for the evaluated attributes, highlighting acceptable crunchiness and a level of spiciness. *Agave salmiana* flour can be incorporated into baked snack-type products, improving the sensory profile and offering a nutritionally healthy and sustainable alternative.

Keywords: *Agave salmiana,* waste, snack, sensory acceptance, texture.

1. INTRODUCCIÓN

El maguey pulquero (*Agave salmiana*) es una planta de amplia distribución en la región central de México, El maguey pulquero es una de las especies botánicas autóctonas utilizadas desde la época prehispánica. Esta especie crece en regiones frías y templadas en forma silvestre y cultivada. El principal producto que se ha obtenido hasta la fecha de esta planta es el aguamiel (liquido opalescente de sabor dulce) destinado a la elaboración semiindustrial de pulque (bebida alcohólica) cuya explotación de aguamiel es de 4 a 6 semanas a partir de la edad adulta de la planta, la cual es de 8 a 10 años, esta posteriormente muere y es desechada. Durante el crecimiento de la planta se realizan prácticas agrícolas de poda, donde se remueven las pencas y estas dispuestas al lado del maguey como abono. El desperdicio de estas pencas es aproximadamente un 80 % en peso seco, las cuales no son explotadas (Flores et al. 2022). Por otra parte, las pencas de agave son generalmente empleadas como forraje para ganado, en la producción de platillos gastronómicos, como la barbacoa de borrego, así como recipientes para beber el propio pulque, en la producción de platillos gastronómicos, como la barbacoa, se usan en la elaboración de casas y techos rústicos, así como recipientes para beber el propio pulque o con fines estéticos en jardines y viviendas. También, la penca del maguey presenta múltiples usos en la medicina tradicional mexicana, como tratamiento de dolencias con propiedades antiinflamatorias, analgésicas y cicatrizantes, los productores indican que se puede aplicar directamente sobre heridas, quemaduras y picaduras de insectos para aliviar el dolor y acelerar la cicatrización, así como las pencas pueden presentar excoriación y enrojecimiento en la piel, denominado “guishe” (comunicación personal Sr. Rodolfo del Razo).

Por otro lado, estudios recientes sobre el potencial de uso del maguey, destaca la identificación de compuestos bioactivos en las pencas, entre estos compuestos destaca la fibra dietética, azúcares tipo fructano y minerales de interés alimentario (Escamilla-Treviño et al., 2020). En años recientes, la agroindustria del agave ha explorado nuevos usos para esta especie, orientados hacia el desarrollo de productos alimenticios con valor agregado (alimentos funcionales y suplementos para la salud) y bajo impacto ambiental (Cervantes-Hernández et al., 2022). No obstante, su aprovechamiento integral continúa siendo limitado, pese a que existe evidencia que el aprovechamiento de las pencas radica en que son consideradas ricas en compuestos de interés por su capacidad antioxidante, fibra dietética, fenoles y flavonoides, sustancias benéficas para la salud (Medina-Mendoza, et al., 2022). La fibra dietaría es un componente importante en la dieta para mantener un equilibrio en enfermedades

comprometidas en la salud humana. La fibra ayuda a disminuir el índice glicémico, apoya al control de enfermedades cardiovasculares, etc.

El mercado actual de botanas en México ha mostrado un crecimiento sostenido, con una tendencia hacia productos más saludables y naturales (INEGI, 2023). Sin embargo, la mayoría de las botanas disponibles son fritas y presentan alto contenido de grasa y sodio. En este contexto, la elaboración de churros horneados a partir de harina de maguey representa una alternativa tecnológica viable para diversificar la oferta alimentaria y fomentar el uso de ingredientes tradicionales.

El proceso de horneado reduce significativamente la absorción de grasa, mientras que la harina de maguey puede aportar fibra dietética y compuestos prebióticos (García-Gómez et al., 2021). Además, los atributos sensoriales como crocancia y picor son determinantes en la aceptación de este tipo de productos, pues definen la experiencia y aceptación del consumidor y la percepción de calidad (Ramírez-González et al., 2022).

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la aceptación sensorial, la crocancia y el picor de los churros horneados elaborados con harina de maguey pulquero, utilizando una evaluación sensorial como es pruebas de control escalar, análisis de textura y aceptación.

2. METODOLOGÍA Y MATERIALES

2.1 Elaboración de la botana tipo churro

Materia prima: Las pencas maduras de *Agave salmiana* fueron recolectadas en el Rancho San Isidro, en Nanacamilpa, municipio de Calpulalpan, Tlaxcala, México. Las pencas se limpiaron, lavaron (jabón neutro), se trocearon (cubos de 2 cm^2) y deshidrataron a 60 °C durante 48 h. Posteriormente se molieron hasta obtener una harina con tamaño de partícula de 250 µm. Se empleó harina de maíz comercial, sal, aceite vegetal y condimento en polvo picante.

Se desarrollaron 3 formulaciones con las harinas de maíz y trigo (una combinación de ambos granos, con la harina de maguey). En proporciones (S:S) de 0.5:1:1, 0.5:2:0 y 0.5:2:0. Se adiciono los ingredientes (ácido cítrico, polvo de cebolla, ajo, picante (1%), pimienta, sal (0.1%) y agua (25%). Las mezclas se realizaron acorde a las formulaciones para obtener las masas, estas se extruyeron en forma de churros y se hornearon a 170±3 °C durante 25 minutos ± 2. Los productos se enfriaron a temperatura ambiente y se envasaron en bolsas de papel selladas. Las 3 formulaciones elaboradas fueron codificadas con las claves C015, D334, P888 y se elaboró una cuarta formula acorde a los ingredientes convencionales, solo se empleó harina de trigo, más ingredientes complementarios, esta fórmula se codifico con a clave V505, esta sirve como una formulación objetivo o estándar buscando encontrar la formulación que más se asemeje a esta.

2.2 Caracterización de la harina de la penca de agave

La caracterización de la composición de la harina de maguey se realizó siguiendo los métodos oficiales de la AOAC (2000). El contenido de humedad se determinó por secado en estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante (método 925.09). La cuantificación de cenizas método 923.03. El contenido proteico con el método Kjeldahl (920.87), aplicando el factor de conversión de nitrógeno a proteína. La fracción lipídica mediante extracción Soxhlet (920.39). Los azúcares totales se cuantificaron por el método colorimétrico fenol–sulfúrico, propuesto por Dubois et al. (1956) y azúcares reductores con el método DNS, utilizando glucosa como estándar (0 a 10 mg mL^{-1}). La fibra dietaría, se realizó por el método oficial AOAC 985.29 (2000), el cual consiste en una digestión enzimática secuencial con α-amilasa, proteasa y amiloglucosidasa.

2.3 Evaluación sensorial

Selección de jueces

Los jueces que evaluaron cada una de las formulaciones, se seleccionaron acorde al hábito de ser consumidores de botanas, además que contaran con experiencia sensorial para identificar características específicas del producto, para ello se realizó un cuestionario de selección de jueces, con la ayuda de la plataforma de “formularios de Google”. Las preguntas fueron para determinar y evaluar características de hábitos de las personas, como es su estado de salud, horarios de comida, preferencia de alimentos y bebidas, si hacen deporte, a fin de evaluar patrones de conducta, hasta factores escolares o laborales, descartando fumadores, personas con enfermedades respiratorias o gastrointestinales. Se seleccionaron jueces (34 hombres y 34 mujeres, de 18 a 45 años) habituados al consumo de botanas.

Prueba de perfil de sabor o aceptación.

Esta prueba permite detectar pequeños cambios en el sabor del producto que está siendo evaluado. (Hernández Alarcón E. 2005). Se aplicó una prueba afectiva de aceptación. Se evaluaron los atributos de color, aroma, sabor, textura, crocancia, picor y aceptación global mediante una escala hedónica de 9 puntos, donde 1 = me disgusta extremadamente y 9 = me gusta extremadamente).

Prueba de control escalar

En esta prueba se evaluaron los parámetros de crocancia y picor, donde los consumidores calificaron la intensidad percibida de cada atributo en una escala de 5 puntos (1 = muy baja; 5 = muy alta).

En estas pruebas participaron 68 panelistas.

2.4 Análisis de resultados

Los datos fueron analizados mediante ANOVA y prueba de Tukey ($p < 0.05$), chi-cuadrado, Dunnett y vida útil por distribución de Weibull, utilizando el software Minitab, versión 17.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización de la harina de agave salmiana

La harina de maguey fue parcialmente caracterizada, en la tabla 1, se muestra los datos obtenidos de su composición, en base seca. Los grados Brix son de 37.4± 0.2, en base fresca.

Ayala et al., 2025, muestran valores similares a los obtenidos en este trabajo, ellos reportan un valor alrededor de 35 °Brix. Los valores reportados para la penca son similares a los descritos por Pinos-Rodríguez, et al. (2008) y Flores et al., (2022), estos autores describen que la composición de las pencas de maguey depende del metabolismo y de la edad de la planta.

Tabla 1. Contenido de la harina

Componentes	(g 100gr^{-1})*
Humedad	2.60 ± 0.21
Cenizas	2.11 ± 0.11
Proteína	2.88 ± 0.12
Azúcares totales	49.06 ± 0.22
Azucares reductores	5.20 ± 0.21
Fibra dietaría (mg g^{-1})	0.96 ± 0.10
Grasas	0.21 ± 0.01

*Es el promedio de 3 repeticiones más la desviación estándar

3.2 Evaluación sensorial de una botana tipo churro elaborada de la combinación de harina de maguey, de maíz y trigo.

Prueba de perfil de sabor

En esta prueba, la formulación C015 (50% harina de maguey) obtuvo la mayor aceptación global para los atributos evaluados, con un puntaje promedio de 7.9 ± 0.4, mientras que las formulaciones D334 y P888 presentaron valores de 7.2 ± 0.3 y 7.1 ± 0.2, respectivamente. Los atributos de sabor y crocancia fueron los más valorados por los consumidores, sin diferencias significativas ($p > 0.05$) entre las formulaciones D334 y C015. La formula P888 si mostró una diferencia significativa con respecto a las otras formulaciones, acorde a una prueba Tukey (α=0.5%).

3.3. Control escalar: crocancia y picor

Los resultados del control escalar mostraron que la formulación C015 fue percibida con una crocancia ideal (3.9 ± 0.3 puntos) y un picor moderado (3.6 ± 0.2 puntos), considerados agradables por los jueces participantes. En cambio, P888 fue evaluada con una crocancia ligeramente mayor (4.3 ± 0.3) pero un picor excesivo (4.2 ± 0.4), lo cual redujo su aceptación total. Además, presentó una dureza mayor que las otras formulaciones. Las dos formulaciones (C015 y D334) fueron más aceptadas, comparadas con la muestra estándar (V505).

Los resultados sugieren que la incorporación de un 50% de harina de *Agave salmiana* en churros horneados mantiene una aceptación sensorial alta y mejora la textura crocante del producto. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Valadez-Carmona et al. (2019), quienes destacaron que los fructanos y fibras del maguey incrementan la porosidad en matrices horneadas, contribuyendo a una textura más crujiente.

Estas aseveraciones respecto a la combinación de las harinas (agave, maíz y trigo) para la elaboración de la masa para extrusión de churros se comprueba a través de una prueba no paramétrica (Chi-cuadrada) debido a que los datos no tenían un comportamiento normal, el valor de p mayor a la estimación comprobó la hipótesis nula que indica que no existe variabilidad importante entre el uso de harinas alternativas, en este caso la harina de maguey, para $p > 0.05$. La prueba Dunnett, reporta que la formula C015 es la que más se asemeja a la formula (V505) que corresponde al estándar referente a la harina (trigo) utilizada para elaborar churros convencionales (Fig. 1).

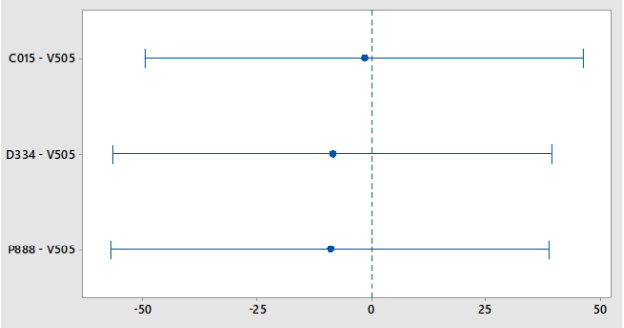


Figura 1. Prueba Dunnett: Comparación de contenido de harinas en las formulaciones (C015, D334 y P888) respecto al estándar (V505).

Por otra parte, los churros obtenidos y empacados en bolsas de papel cerrados herméticamente adquirían humedad del medio ambiente, que los deterioraba y se perdía la crocancia. Estadísticamente, se realizó una prueba de distribución de Weibull, para evaluar la caducidad, de la cual se obtuvo como resultado un MTBF de 25.8 días, este valor indica que tenemos una duración de 26 días de confiabilidad del consumo de las botanas, estableciendo esta fecha para su vida útil.

La evaluación escalar de crocancia y picor permitió identificar la formulación con equilibrio sensorial, aspecto esencial para el desarrollo de botanas aceptadas comercialmente (Pérez-López et al., 2021). El aumento del picor observado en P888 puede deberse a la mayor retención de condimento en la superficie por efecto de la fibra del maguey, fenómeno también reportado en estudios de snacks funcionales a base de nopal (Ramírez-González et al., 2022).

De acuerdo con los resultados de las pruebas de evaluación sensorial respecto a las tres formulaciones elaboradas, se determina que la de mejor aceptación otorgada por los jueces fue la fórmula C015 con una relación de 0.5:1:1 de las harinas, agave, maíz y trigo, considerando el nivel de significancia de p≈ 0.5. estos resultados muestran que es necesario mejorar las formulaciones para poder en un futuro incursionar en el mercado de las botanas deshidratadas e indagar si es posible puedan ser procesadas las mismas formulaciones en botanas elaboradas por procesos convencionales tipo fritura que den una mejor aceptación en el mercado.

Desde una perspectiva tecnológica, el maguey pulquero aporta compuestos estructurales que favorecen la expansión durante

el horneado, mejorando la crocancia sin recurrir al proceso de fritura. Además, su inclusión representa una oportunidad de valorización agroindustrial, al emplear recursos locales de zonas semiáridas con bajo costo y alto rendimiento (Cervantes-Hernández et al., 2022).

4. CONCLUSION

La elaboración de churros horneados con 50% de harina de *Agave salmiana* generó un producto con aceptación sensorial elevada, con una crocancia agradable y picor moderado, atributos clave para la satisfacción del consumidor. El uso de esta harina contribuye a mejorar la textura, reducir el contenido graso y diversificar el aprovechamiento del maguey pulquero en la industria alimentaria.

Los resultados confirman el potencial del *Agave salmiana* como ingrediente funcional y sustentable en el desarrollo de botanas saludables, destacando la viabilidad tecnológica y la preferencia positiva de los consumidores hacia este tipo de productos innovadores.

REFERENCIAS

Ayala Niño, Ayala Niño, A., Pavón Silva, T. B., Zarazúa Aguilar, Y., Sánchez Franco, J.A. (2025). Aqueous extract of agave pulquero (*Agave salmiana*) leaves as a source of dietetic fiber and compounds with antioxidant capacity. Revista BioCiencias, 12, e1772. https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1772

Cervantes-Hernández, M., López, M. E., & Rangel, R. (2022). Aprovechamiento integral del maguey pulquero (*Agave salmiana*) en la agroindustria mexicana. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 13(4), 745–758. https://doi.org/10.29312/remexca.v13i4.2885

Escamilla-Treviño, L. L., Contreras, A., & Becerra, M. (2020). Nutritional potential of agave-derived flour for human consumption. Journal of Food Composition and Analysis, 92, 103577. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103577

Flores-Morales A.; Aquino-Juárez D. V., Ocaranza-Sánchez E. & Sánchez-Contreras A. (2022). Cap. 6. El maguey pulquero, descripción del cultivo y explotación en el Estado de Tlaxcala. En: Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis (pp 350-356). México. Editores: Programa Mexicano del Carbono (PMC)/ Instituto de Ecología, A.C. (INECOL). Texcoco, Estado de México, México. ISSN 2954-4882. 404 p.

García-Gómez, A., López-Morales, M., & Vargas, L. (2021). Consumer acceptance of healthy snack alternatives based on traditional Mexican crops. Food Research International, 144, 110364. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110364

INEGI. (2023). Estadísticas sobre el consumo de alimentos procesados en México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Medina-Mendoza, C., Mendoza-Tolentino, Y., & Cervantes-Miranda, J. (2022). Determination of bioactive compounds in stalks of maguey pulquero (Agave salmiana). Revista de Ingeniería y Tecnologías para el Desarrollo Sustentable, 10(1), 34-41.

A.O.A.C. (2000). Official Methods of Analysis of AOAC International (17th ed.). USA. MD: Association of Official Analytical Chemist.

Pérez-López, D., Martínez, M., & Jiménez, L. (2021). Consumer perception and textural analysis of baked snacks enriched with plant fibers. Journal of Texture Studies, 52(3), 211–221. https://doi.org/10.1111/jtxs.12595

Pinos-Rodríguez, J. M., Zamudio, M., & González, S. S. (2008). The effect of plant age on the chemical composition of fresh and ensiled *Agave salmiana* leaves. South African Journal of Animal Science, 38(1), 43-50. http://dx.doi.org/10.4314/sajas.v38i1.4108

Ramírez-González, C., Pérez, D., & Salgado, L. (2022). Evaluación sensorial y nutricional de botanas funcionales elaboradas con nopal y amaranto. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, 23(1), 55–63.

Valadez-Carmona, L., Plazola-Jacinto, C., & Jasso-Cantú, D. (2019). Bioactive compounds in agave species and their potential use in functional foods. Journal of Functional Foods, 62, 103514. https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103514

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Improvements in Asexual Propagation of *Stevia rebaudiana* Bertoni Through the Use of Biostimulants in Michoacan, Mexico

Juan Carlos Álvarez Hernández*, Abraham Chávez Morales**

**Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental Valle de Apatzingán. Antúnez, Michoacán, México. C. P. 60781 (e-mail: alvarez.juan@inifap.gob.mx)*

***Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico Superior de Apatzingán. Apatzingán, Michoacán, México (e-mail: abraham.cm@apatzingan.tecnm.mx).*

Abstract: *Stevia rebaudiana* Bertoni is an agro-industrially relevant species that can be propagated by seed and, more commonly, through vegetative multiplication. However, the lack of standardized protocols limits the production of high-quality seedlings for the establishment of commercial plantations. The objective of this study was to evaluate the performance of terminal and intermediate shoots of stevia treated with biostimulants, fungicides, and foliar fertilizers in different support media. The research was conducted in the environmental conditions of Apatzingan, Michoacan, Mexico. Three sequential trials were carried out: (1) comparison of terminal and intermediate shoots impregnated with fungicide and rooting agent versus controls; (2) application of biostimulants by spraying on terminal shoots; and (3) combined application of biostimulants and foliar fertilizer in two types of support media. Main variables included plant height and leaf number, and data were analyzed using ANOVA. Results showed that terminal shoots treated with biostimulants, either alone or combined with foliar fertilizer, achieved the best performance. It is concluded that terminal shoots supplemented with biostimulants represent the most efficient option for the asexual propagation of *S. rebaudiana*.

Keywords: Asexual propagation, biostimulants, foliar fertilization, seedling production, terminal shoots.

1. INTRODUCIÓN

En América Latina, el cultivo de estevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) representa una alternativa agrícola de creciente relevancia social, debido a que los edulcorantes derivados de esta especie, se emplean como sustitutos del azúcar en el tratamiento y prevención de enfermedades crónicas no transmisibles, entre ellas el sobrepeso y la diabetes (Durán *et al*., 2012; Velasco y Echavarría, 2011). La estevia es considerada un aditivo alimentario de bajo contenido calórico con un potencial fármaco para pacientes diabéticos (Yong-Heng *et al*., 2014). Su valor radica en la presencia de glucósidos, principalmente el esteviósido, cuyo poder edulcorante en estado puro y cristalino es aproximadamente 300 veces superior al de sacarosa, además, contribuye a la reducción de los niveles de glucosa en sangre hasta en un 35% (Rojas *et al*., 2007; Reyes *et al*., 2014).

El uso de estevia en alimentos y bebidas fue aprobado en 2008 en Estados Unidos y en 2010 en la Unión Europea. En México, la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) la reconoció en 2009 como segura para el consumo humano, lo que motivó a instituciones como el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) a promover su consumo como estrategia contra la obesidad (CEDRSSA, 2018). El cultivo fue introducido en el país en 2010 a través del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), con el propósito de evaluar su adaptación a diferentes regiones. Para 2011 se registraron las primeras siembras en el sureste mexicano, por sus condiciones agroecológicas favorables. Posteriormente, el estado de Nayarit se consolidó como el principal productor nacional, alcanzando una producción de 324 toneladas, equivalente al 64.7% del total nacional (CEDRSSA, 2018). Así, las condiciones edafo-climáticas de diversas regiones del país, particularmente en los estados del Pacífico, son altamente propicias para el desarrollo del cultivo, por sus características fisiográficas semejantes a las de su lugar de origen, la región de Amambay en Paraguay (Herrera *et al*., 2012).

Desde la perspectiva agronómica, la estevia puede multiplicarse tanto por vía sexual (semilla) como asexual (tejidos vegetativos), siendo esta última la más utilizada en sistemas productivos (Moguel *et al*., 2018). No obstante, los métodos empleados, principalmente mediante brotes o hijuelos, carecen de estandarización y no garantizan la obtención de plántulas homogéneas y de calidad. Este déficit limita la posibilidad de establecer superficies productivas a escala comercial y restringe el desarrollo de proyectos de inversión sustentables. Además, la variabilidad genética presente en materiales criollos introducidos desde Paraguay y Brasil ha ocasionado diferencias morfológicas y fenológicas entre las plantas, reflejadas en rasgos como el tamaño de la planta, dimensiones foliares, época de floración y rendimiento (Ramírez, 2011).

Dada la naturaleza de la especie, se esperaría que la propagación vegetativa sea un proceso relativamente sencillo; sin embargo, en la práctica se requiere el diseño de protocolos más eficientes para garantizar la supervivencia y el vigor de las plántulas. El objetivo fue evaluar la respuesta de brotes terminales e intermedios de estevia ante la aplicación de bioestimulantes y fertilizantes foliares en medios de soporte, para optimizar la producción de plántulas de calidad.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1 Sitio experimental

El estudio se desarrolló en Apatzingán, Michoacán, México Según la clasificación climática de Köppen, modificada por García (2004), la región presenta un clima BS_1, correspondiente a climas secos muy cálidos, con temperatura media anual >22 °C, temperatura del mes más frío >18 °C y régimen de lluvias concentrado en verano. Los suelos predominantes son vertisol pélico de textura fina y fase pedregosa (INEGI, 2016). La vegetación circundante está constituida por selva baja caducifolia, etapas secundarias de sucesión natural de porte arbustivo (4-8 m) y arbóreo (8-12 m), con pequeñas extensiones de bosques de encino y pino en elevaciones mayores (Andres *et al*., 1994).

2.2 Genotipo empleado

Se utilizó el genotipo de estevia cv. Morita II, colectado en plantaciones comerciales de Santiago Ixcuintla, Nayarit, México. Las plántulas madre fueron desarrolladas en charolas de poliestireno, posteriormente se trasplantaron a bolsas negras con capacidad de 2 kg de suelo de textura franco, conocido comúnmente como "Topure", lo anterior para favorecer la inducción y desarrollo de brotes vegetativos, que luego fueron destinados a las evaluaciones (Figura 1).

Figura 1. Germoplasma de origen, planta madre de estevia.

2.3 Tratamientos experimentales

Se realizaron tres evaluaciones sucesivas, ajustadas en función de los resultados de cada ensayo previo. Los tratamientos consistieron en combinaciones de tipo de brote, acondicionamiento y aditivos aplicados sobre sustratos comerciales (Growing Mix IVM®, Canadian Sphagnum Peat Moss) contenidos en charolas de 244 cavidades, e incluyó adicionalmente suelo como medio de soporte (Figura 2).

Figura 2. Establecimiento experimental de brotes de estevia.

Evaluación 1. Se compararon brotes terminales e intermedios, cada brote compuesto con cuatro pares de hojas uniformes, tratados con enraizador (Raizal® R) y fungicida (Carbendazim, Tlaloc® F), e insertados verticalmente en charolas de poliestireno con sustrato tipo Peat Moss bajo sombreado natural y riego (cuadro 1).

Cuadro1. Tratamientos de la primera evaluación.

No.	Tratamiento	Abreviación
1	Brote terminal impregnado con R	BTR
2	Brote intermedio impregnado con R	BIR
3	Brote terminal impregnado con F	BTF
4	Brote intermedio impregnado con F	BIF
5	Brote terminal	BT
6	Brote intermedio	BI

Evaluación 2. Se seleccionaron brotes terminales con cuatro pares de hojas, delimitados con hilos holgados para identificar el desarrollo, y se asperjaron con distintos bioestimulantes (Maxigrow® (B1), Raizal® (B2), Agromil® (B3), Biozime® (B4) a la dosis recomendada de 1 mL L^{-1} de agua; se mantuvieron bajo sombreado natural y riego (cuadro 2).

Cuadro 2. Tratamientos de la segunda evaluación.

No.	Tratamiento	Abreviación
1	Brote terminal asperjado con B1	B1
2	Brote terminal asperjado con B2	B2
3	Brote terminal asperjado con B3	B3
4	Brote terminal asperjado con B4	B4
5	Testigo (brote terminal)	T

Evaluación 3. Brotes terminales con cuatro pares de hojas se insertaron directamente en charolas con sustrato y suelo, y se asperjaron con mezcla de bioestimulante a base de algas marinas (B) y fertilizante foliar con fósforo (Fosfacel 800® FF) a 1 mL L^{-1}. Las plántulas se mantuvieron bajo sombreado natural y riego (cuadro 3).

Cuadro 3. Tratamientos de la tercera evaluación.

No.	Tratamiento	Abreviación
1	Brote terminal con B más FF en sustrato	B+FF/Sust.
2	Brote terminal sin B más FF en sustrato	Sin B+FF/Sust.
3	Brote terminal con B más FF en suelo	B+FF/Suelo
4	Brote terminal sin B más FF en suelo	Sin B+FF/Suelo

2.4 Diseño experimental

Se empleó un diseño experimental en bloques completos al azar. La primera evaluación consideró seis tratamientos, la segunda evaluación con cinco tratamientos y la tercera evaluación con cuatro tratamientos.

2.5 Variables evaluadas

Altura de plántulas. Longitud de los brotes medida con regla graduada a los 15 días post-establecimiento; en las

evaluaciones 2 y 3 se midió antes y 15 días después de la aplicación.

Número de hojas. Conteo visual de hojas desarrolladas; mismo procedimiento que la altura.

Diámetro de tallo. Medido con vernier ligeramente por encima del sustrato; registrado únicamente en la primera evaluación a los 15 días.

Vigor de plántula. Evaluación cualitativa mediante escala ordinal (Cuadro 4) a los 15 días post-establecimiento; solo en la primera evaluación.

Prendimiento. Porcentaje de sobrevivencia, derivado de la escala de vigor; solo en la primera evaluación.

2.6 Registro y análisis de datos

Los datos se analizaron mediante ANOVA y comparación de medias con Tukey ($P \leq 0.05$). Para la variable vigor, se aplicó análisis no paramétrico (Kruskal-Wallis) y comparación de medias con Mann-Whitney ($P \leq 0.05$), se utilizaron los paquetes estadísticos SAS (2002) y Past 3.2 (Hammer, 2018).

Cuadro 4. Escala ordinal de vigor de plántula

Valor	Calificativo	Características visuales
5	Plántula vigorosa	Tallos y hojas erguidos, color verde intenso, protuberancias de yemas axilares visibles, sanidad completa.
4	Plántula con buen vigor	Tallos y hojas erguidos, hojas de color verde intenso, sin yemas axilares visibles, sanidad completa.
3	Plántula con poco vigor	Tallos y hojas poco erguidos, hojas de color verde, sin yemas axilares visibles, sanidad completa.
2	Plántula menos vigorosa	Tallos y hojas curvas, amarillentas, sin yemas axilares visibles, algunas necrosidades en los brotes.
1	Plántula raquítica	Tallos y hojas decaídos, hojas amarillentas, necrosidades visibles en la mayor parte de los brotes.

3. RESULTADOS

3.1 Primera evaluación

Después del establecimiento de los brotes, el análisis de varianza indicó que, de las variables evaluadas (altura, diámetro de tallo y número de hojas), únicamente el número de hojas presentó diferencias estadísticas significativas (P=0.001) (Cuadro 5). Los tratamientos BIR y BIF destacaron con el mayor número de hojas, con 9.66 y 9.50, respectivamente. Por su parte, en la variable altura de los brotes, esta osciló entre 2.60 y 3.76 cm, en cambio, el diámetro de tallo rondo entre 0.83 y 1.40 cm, ambos sin diferencias significativas.

En cuanto a la distribución porcentual de plántulas según la escala de vigor implementada, se encontró que los tratamientos BTF y BT presentaron el menor porcentaje de plántulas raquíticas (valor 1) y 20% de plántulas vigorosas (valor 5), destacándose sobre los demás tratamientos (Figura 3).

Cuadro 5. Desarrollo de plántulas de estevia. 1ra. evaluación.

No.	Tratamientos	Altura (cm)[z]	Diámetro (cm)	Hojas (No.)
1	BTR	3.53 a	0.95 a	4.0 bc
2	BIR	3.76 a	0.96 a	9.66 a
3	BTF	3.08 a	1.16 a	2.66 c
4	BIF	3.66 a	1.18 a	9.50 ab
5	BT	3.66 a	0.83 a	3.83 c
6	BI	2.6 a	1.40 a	6 abc
	C.V.	29.03	33.52	53.38
	P	0.3	0.12	0.001

[z]Letras diferentes en la columna, indican diferencias estadísticas, (Tukey, P=0.05). C.V.= Coeficiente de variación.

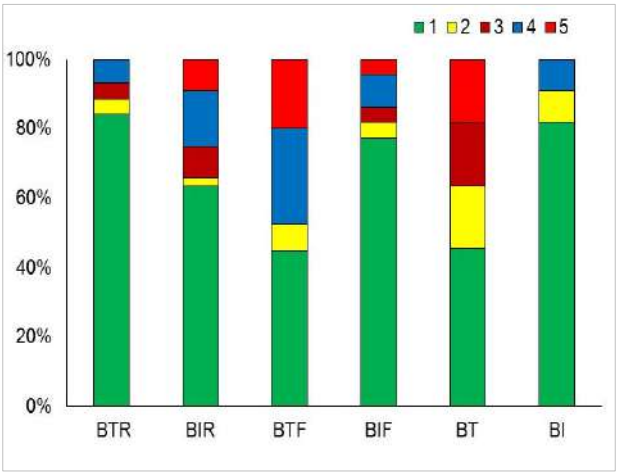


Figura 3. Distribución porcentual de cinco niveles de valoración sobre el vigor de brotes de estevia. 1ra. evaluación.

El análisis de varianza realizado para la variable vigor, indicó diferencias significativas (P=0.003). De acuerdo a la escala de valoración (cuadro 4), el tratamiento más vigoroso fue BTF seguido de BIR y BT (≥2, "menos vigorosa"), mientras que el resto presentó valores cercanos a 1 ("raquítica") (Cuadro 6).

Cuadro 6. Vigor de plántulas de estevia. 1ra. evaluación.

No.	Tratamientos	Vigor[z]
1	BTR	1.18 b[y]
2	BIR	2.36 ab
3	BTF	3.18 a
4	BIF	1.54 b
5	BT	2.27 ab
6	BI	1.36 b
	H	13.22
	HC	17.47
-	*P*	0.003

[z]Kruskal-Wallis (prueba no paramétrica); y Separación de medias Mann-Whitney (letras diferentes en la columna, indican diferencias estadísticas, P=0.05; H = Estadístico H calculado; HC = Valor crítico.

3.2 Segunda evaluación

Los brotes terminales sometidos a bioestimulantes mostraron incremento en altura y número de hojas después de 10 días de la aplicación. Aunque las diferencias en altura no fueron significativas (*P*=0.83), se observó una tendencia superior en todos los tratamientos bioestimulantes respecto al testigo (Figura 4).

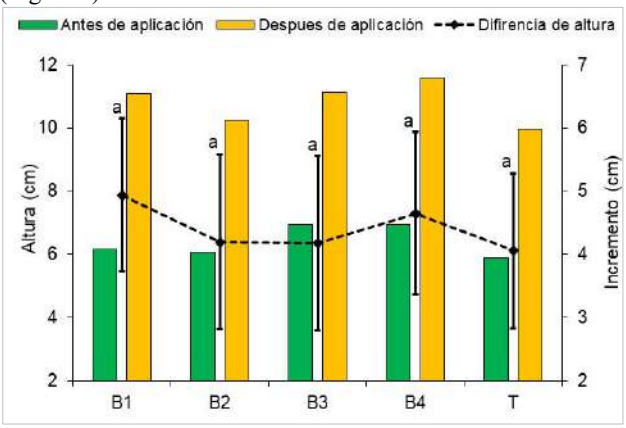


Figura 4. Efecto de bioestimulantes en el desarrollo de altura en brotes terminales de estevia. 2da. evaluación. Tratamientos: B1 (Maxigrow®), B2 (Raizal®), B3 (Agromil®), B4 (Biozime®) T (Testigo). Líneas verticales corresponden a la amplitud del intervalo de confianza (95%); n=10. *P*=0.83. Coeficiente de variación: 44.40.

Respecto a la variable número de hojas, de manera general, al inicio de evaluación el número promedio de hojas para todos los tratamientos partió de 8 hojas. Asimismo, se registró un aumento significativo (*P*=0.0002). Los tratamientos B2 (Raizal®), B3 (Agromil®) y B4 (Biozime®) presentaron incrementos mayores (17.6–21.4 hojas), mientras que B1 (Maxigrow®) mostró valores intermedios y el testigo menor incremento (14.3 hojas) (Figura 5).

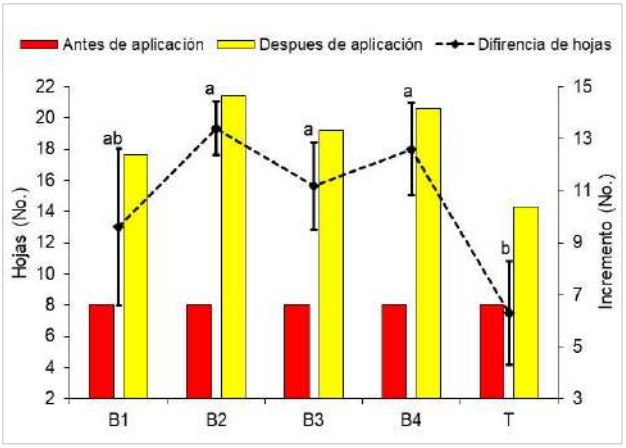


Figura 5. Efecto de bioestimulantes en el desarrollo de hojas en brotes terminales de estevia. 2da. evaluación. Tratamientos: B1 (Maxigrow®), B2 (Raizal®), B3 (Agromil®), B4 (Biozime®), T (Testigo). Líneas verticales corresponden a la amplitud del intervalo de confianza (95%); n=10. *P*=0.0002. Coeficiente de variación: 44.40.

3.3 Tercera evaluación

La combinación de bioestimulante con fertilizante foliar (B+FF) aplicada en sustrato y suelo mostró efectos significativos sobre altura y número de hojas (*P*=0.0022 y *P*=0.0035, respectivamente). Los brotes tratados alcanzaronalturas cercanas a 12 cm, superando a los tratamientos sin B+FF (8 cm) (Figura 6).

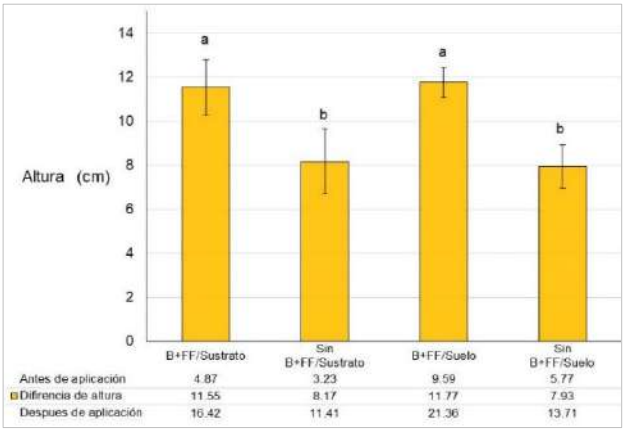


Figura 6. Efecto de bioestimulante y fertilizante foliar en sustrato y suelo en el desarrollo de altura de brotes terminales de estevia. 3ra. evaluación. B+FF (biofertilizante mas fertilizante foliar). Líneas verticales corresponden a la amplitud del intervalo de confianza (95%); n=4. *P*=0.0022. Coeficiente de variación: 12.81.

En la variable número de hojas, el análisis de varianza detectó diferencias, en el conjunto de datos de entre la diferencia antes y después de la aplicación. De manera similar a la variable altura, el número de hojas fue mayor en los tratamientos B+FF tanto en sustrato como en suelo (5.27–6.75 hojas), comparado con los testigos (3.4-4.55 hojas) (Figura 7 y Figura 8).

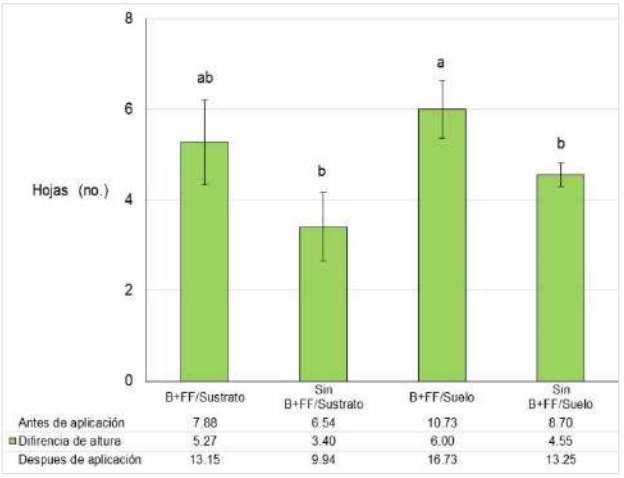


Figura 7. Efecto de bioestimulante y fertilizante foliar en sustrato y suelo en el desarrollo de hojas de brotes terminales de estevia. 3ra. evaluación. B+FF (biofertilizante mas fertilizante foliar). Líneas verticales corresponden a la amplitud del intervalo de confianza (95%); n=4. *P*= 0.0035. Coeficiente de variación: 17.98

Figura 8. Aspecto brotes establecidos en sustrato y suelo.

4. DISCUSIÓN

Es importante señalar que la estevia se adapta eficientemente a regiones tropicales y subtropicales con altitudes que oscilan desde el nivel del mar hasta los 1,200 metros (Ramírez, 2011). A pesar de su potencial productivo, el desarrollo de variedades mejoradas y la optimización de los métodos de propagación han avanzado de manera limitada.

La reproducción sexual de estevia presenta desventajas significativas que afectan la eficiencia del cultivo, incluyendo alta heterogeneidad genética de las poblaciones derivadas de semilla, baja germinación por el elevado porcentaje de semillas estériles y la dificultad de recolección debido a la desuniformidad en floración y maduración (Suárez y Salgado, 2008). Estas limitaciones favorecen la propagación asexual mediante esquejes vegetativos, considerada la estrategia más recomendable para la producción comercial.

En este método, los esquejes terminales de ramas secundarias, terciarias y cuaternarias requieren un período de enraizamiento de 12 a 15 días. Sin embargo, su eficacia puede verse limitada por bajas tasas de multiplicación (Suárez y Salgado, 2008).

Los resultados de las evaluaciones realizadas en este estudio permiten identificar aspectos críticos para optimizar la propagación asexual. En primer lugar, se confirmó que los brotes terminales presentan un mayor vigor y capacidad de enraizamiento comparados con los brotes intermedios (Cuadro 6; Figura 3), lo que sugiere que la selección del tipo de tejido es un factor determinante para la obtención de plántulas de calidad.

En segundo lugar, la incorporación de bioestimulantes mostró un efecto positivo sobre el desarrollo de los brotes. Durante la segunda evaluación, los tratamientos con bioestimulantes (B2, B3 y B4) generaron incrementos superiores en altura y número de hojas respecto al testigo (Figuras 4 y 5), lo que evidencia la importancia de incluir estos aditivos en los protocolos de propagación para estimular la fisiología vegetal y mejorar el crecimiento inicial de los esquejes.

Finalmente, la evaluación del medio de soporte reveló que la combinación de bioestimulante y fertilizante foliar favoreció significativamente el desarrollo de altura y número de hojas, tanto en sustrato como en suelo (Figuras 6 y 7). Esto indica que la interacción entre el tratamiento aplicado y el medio de soporte es determinante para maximizar la calidad y uniformidad de las plántulas.

En conjunto, estos hallazgos proporcionan una base sólida para perfeccionar los sistemas de propagación asexual de estevia (*S. rebaudiana*), contribuyendo a la estandarización de la producción de plántulas de alta calidad y facilitando el establecimiento de proyectos productivos sostenibles.

5. CONCLUSIONES

La selección del tejido vegetal es un factor crítico para la propagación de *Stevia rebaudiana*, destacando los brotes terminales como la opción más eficiente. La altura de los brotes terminales e intermedios no presentó diferencias significativas frente a los tratamientos aplicados; sin embargo, el número de hojas sí mostró respuesta positiva, siendo mayor en los tratamientos respecto al testigo. La incorporación de bioestimulantes mejora significativamente la calidad de las plántulas, favoreciendo su desarrollo y enraizamiento, lo que permite una multiplicación más eficaz y uniforme.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, por el apoyo otorgado y las facilidades concedidas para llevar a cabo esta investigación.

REFERENCIAS

Andrés, A. J., Arteaga, L. G., Blancarte, D. M., Calderón, A. J. H., López, P. V., Rivera, M. S., Romero, P. J., Santos, C. C. (1994). La producción agropecuaria de la región Valle de Tepalcatepec Michoacán. 1ra. Edición. Universidad Autónoma de Chapingo. 652 p.

CEDRSSA (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria). (2018). Oportunidades para la agricultura en México: la estevia. Palacio Legislativo de San Lázaro. México. 56 p.

Duran, A. S., Rodríguez, N. M. P., Cordon, A. K., Record, C. J. (2012). Estevia (*Stevia rebaudiana*), edulcorante natural y no calórico. *Revista Chilena de Nutrición*. 39(4), 203-206.

García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. 5ta. ed. UNAM. México. 246 p. ISBN: 970-32-1010-4.

Hammer, Ø. (2018). PAST V. 3.2 Reference manual. Natural History Museum, University of Oslo. 262 p.

Herrera, C. F., Gómez, J. R., González, R. C. (2012). El cultivo de stevia (*Stevia rebaudiana*) Bertoni en condiciones agroambientales de Nayarit, México. Folleto Técnico Número 19. INIFAP, CIRPAC, C. E. Santiago Ixcuintla. 43 p.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México). 723 p.

Moguel, O. Y., Ramirez, J. G., Tepal, C. J. (2018). Efecto de la calidad del agua y sustratos en la producción de plántulas de estevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 21, 4284-4295.

Ramírez, J. G. (2011). Paquete tecnológico estevia (*Stevia rebaudiana*) establecimiento y mantenimiento. Publicación especial. Centro de Investigación Regional Sureste, Campo Experimental Mocochá. Mocochá Yucatán. 14 p.

Rojas, P. S. A., Díaz, N. C. D., López, C. C. A., Barrera, A. N. P., Osorio, B. C. (2007). Stevia el dulce sabor de tu vida-Plan Estratégico. Bogota Community College Administración Comercial y Mercadeo Principios de Administración. 130 p.

Reyes, R. S., Herrera, S. M., Menacho, P. L. (2014). Estudio de la Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) como edulcorante natural y su uso en beneficio de la salud. *Scientia Agropecuaria*. 5, 157-163.

SAS Institute Inc (2002). The SAS System for Windows 9.0. Cary, N.C. USA. 421-p.

Suarez, I. E., Salgado, J. A. (2008). Propagación *in vitro* de *Stevia rebaudiana* Bert. (Asteraceae-Eupatorieae) a través de organogénesis. *Temas Agrarios*. 13(1), 40-48.

Velasco, O., Echavarría, S. (2011). Edulcorantes utilizados en alimentos. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. Disponible en: http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/8166/Manuscrito%203%20Edulcorantes2012%20O.%20Velasco.pdf?sequence=1.

Yong-Heng, Y., Su-zhen, H., Yu-lin, H., Hai-yan Y., Chun-sun, G. (2014). Base substitution mutations in uridinediphosphate-dependent glycosyltransferase 76G1 gene of *Stevia rebaudiana* causes the low levels of rebaudioside A Mutations in UGT76G1 A key gene of steviol glycosides synthesis. *Plant Physiol Biochem*. 80, 220-2025.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Structural analysis and evaluation of the magnetic performance of the $LaCaMnO_3$ ceramic

Rafael Guillermo Suárez Nájera*, Armando Reyes Montero*, Marlene González Montiel, Edilso Reguera Ruiz**, Luis Antonio Contreras García* and José Álvaro Chávez Carvayar***

* Instituto de Investigaciones en Materiales. Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de exterior S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Coyoacán, Ciudad de México

** Laboratorio Nacional de Conversión y Almacenamiento de Energía
Centro de Investigaciones en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. Instituto Politécnico Nacional. Calzada Legaria 694. Col. Irrigación, Miguel Hidalgo, C.P. 11500. Ciudad de México, CDMX

Abstract: This study aims to correlate the crystallographic analysis based on Xray diffraction of the $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ ceramic and its magnetic performance for advanced technological applications. X–ray diffraction was instrumental to developing a numerical adjustment, allowing for the analysis of asymmetric Jahn–Teller phenomena. The results of the adjustment suggest that the compound exhibits a stable ferromagnetic phase order. It has been corroborated with M-T curve and detected ferromagnetic order was stable phase up to approximately 250 K.

Keywords: Magnetic properties, crystallography, molecular geometry, ferromagnetic

1. INTRODUCTION

Materials science analyze the relationship between the synthesis, microstructure, and properties of materials. On the other hand, materials engineering focuses on the application of materials science principles to the design, processing, and manufacturing of materials with important physical and chemical properties, with the goal of integrating them into devices, technologies and relevant application. The variety of applications represents a significant challenge due to wide range of physical and chemical properties, as well as the materials involved.

Lanthanum manganites, whose chemical formula is $La_{1-x}A_xMn_{1-y}B_yO_3$, are classified as perovskite (Groover, 2013). The stoichiometric formula covers a range of substitutions: typically at A site with elements like Ca, Sr, Ba, Pb, Na, K and at B site with elements B like Fe, Co, Ni, Cr. The application of these compounds is very promising for technological issues such as sensors, magnetic memories, magnetic refrigeration, fuel cells and catalysis.

The use of lanthanum manganite sensors has been demonstrated in a variety of applications, including temperature, gas, magnetic field, and pressure and deformation sensing. In this case, $La_{1-x}A_xMnO_3$ compounds (A represents Sr, Ca, Ba, Pb, Na and K) function as transducers for temperature sensors (Bartuli et al., 2025; Cadieu et al., 1999; Guan et al., 2023; Wu et al., 2012). $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ materials are used as magnetic field sensors. Sensors based on this compound presents changes in electrical resistance into magnetic field. This is related with magnetoresistance phenomena (MCR) (Wu et al., 2012), in which resistance depends on the temperature.

Haga clic o pulse aquí para escribir texto.As mentioned above, the $LaMnO_3$ base compound exhibits a substantial change in resistance when subjected to an external magnetic field. This phenomenon is known as colossal magnetoresistance (CMR) (Das et al., 2003). This phenomenon can be used for developing Random Access Memory (RAM), for computational resources.

The absorption of oxidative or reducing gases has been shown to induce alterations in electrical conductivity. $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ compounds have been used in the fabrication of gas sensors (Zhao et al., 2024), to detect CO, H_2, CH_4, NO_2, O_2 and others. Also, thin films of $La_{0.8}Ca_{0.2}MnO_3$ and $La_{0.6}Sr_{0.3}Mn_{1.1}O_3$ serve as examples of lanthanum manganites used in pressure or deformation sensors, by mechanical deformation of these films varies the electrical conductivity (Li et al., 2019; Liedienov et al., 2022; Nath et al., 1999).

Magnetic refrigeration is a process that uses magnetocaloric phenomena, which involves a temperature change in the working materials through a magnetic order phase transition. This temperature variation is employed to control the direction of the heat transfer process and achieves temperature control within a specific space. Lanthanum manganite's exhibits a suitable performance in magnetic refrigeration (Franco et al., 2012, 2018).

It is known that electrical and magnetic properties for materials are directly related to the microstructure, such as crystalline phase and chemical bond interaction. Both characteristics are linked with electron transport and magnetic interaction

(Salamon & Jaime, 2001; Salazar-Muñoz et al., 2022; Tayari et al., 2025) which defines the material properties. Atomic arrangement, unit cell parameters, and structural phase (orthorhombic, hexagonal, rhombohedral, tetragonal, cubic, monoclinic, or triclinic) of $LaMnO_3$ based ceramics is affected by modification on the stoichiometric formula, hydrostatic pressure, and temperature.

The application purpose of $LaMnO_3$ base compounds depends on the electronic interactions of the Mn atom, whose valence number can varies between +3 and +4 depending on the chemical configuration between manganese and oxygen atoms. This chemical bonding switching affects electronic interaction promoting a deep influence over the physical and chemical properties.

The analysis of a particular property is evaluated with an specific experiment; for example, the magnetic properties can be measure with vibration sample magnetometry (VSM) and electrical properties could be analyzed with electrical impedance spectrometry (IS). For different kind of samples (bulk, nanoparticles, thin films, wire) some experimental arrangements must be required. There are indirect methods to evaluate this interaction and predict its performance.

In 1973, Jahn, H. A., and Teller, E. published an article in which they formulated the following criterion: "*All non–linear nuclear configuration are therefore unstable for an orbitally degenerate electronic state"* (Jahn & Teller, 1937). This concept can be interpreted as the process of electronic density degeneracy that leads to a reduction in the symmetry of microstructure materials, affecting directly the chemical bonding. This phenomenon produces a variation in the geometric distortions of the molecules (Kim et al., 2021; Sturge, 1968).

The effects of distortion are observable in molecules with linear geometry or in octahedral of transition metal complexes. For example, the $LaMnO_3$ base ceramic presents octahedra with a center containing manganese and oxygen atoms. The distortion of its geometric symmetry results in a particular magnetic order phase: the ferromagnetic phase exhibits high symmetry, and antiferromagnetic phase demonstrates low symmetry (Bao et al., 2023; Conradie et al., 2024; Fan et al., 2025; He et al., 2025).

The geometric distortion of MnO_6 octahedra of $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ is evaluated with a crystallographic analysis to predict magnetic performance. Depending on the stoichiometric substitution the magnetic phase, performance and application purpose could be controlled,. The previous prediction has been corroborated with a magnetization temperature curve (M-T); which reveals an optimum range temperature operation.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1 Synthesis method

The synthesis of $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ was carried out using the Pechini method. Reagents with a purity of ≤ 99% were used. Manganese acetate, lanthanum acetate, and calcium nitrate were meticulously weighted according to calculated stoichiometric ratios.

Reagents were dissolved in deionized water. After dissolving them, included citric acid and ethylene glycol were added to form a resin. The resin was dry at 80 °C for several hours and then subjected to heat treatment at 900°C for 12 hours.

2.2 Characterization techniques

X–ray diffraction was performed using a Bruker D8 diffractometer, with a range of 25–75° for 2θ; and Cu Kα radiation was employed. To determine the presence of $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ phase, a simulated ideal X-ray pattern was used. It was simulated with data obtained from the Crystallography Open Database [23], and simulated in Fullproof, a freely licensed software. A comparison was made between the experimental data and a simulated pattern.

In order to quantify the presence of secondary phases it has been employed MATCH! Software version 3.14 with licensed for IIM-UNAM.

Crystallite size estimation was carried out by using diffraction patterns, with the Scherrer equation (Eq. 1) as a methodological framework:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

where D is the mean crystallite size, K is the shape factor, λ is the X–ray wavelength, β corresponds to the line broadening at half the maximum intensity (FWHM) of peaks and θ is the Bragg angle. The crystallite shape was considered as an ideal sphere shape (K ~0.9).

Atomic force microscopy (AFM) was employed to analyze the particle morphology. This study was performed using a JEOL JSPM-4210 microscope. Imaging was essential for analyzing morphological properties, specifically the average diameter (D_A) and aspect ratio (A_R). The following equations were used in this analysis:

$$D_A = \frac{D_M + D_m}{2} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

$$A_R = \frac{D_M}{D_m} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

where D_M is the distance from the maximum axis and D_m the distance from the minimum axis.

Mathematical adjust was employed in three dimensional atomic model. It was analyzed using free license Vesta software, with particular attention to manganese (MnO_6) octahedra. The present analysis focuses on the Jahn–Teller asymmetry of the Mn–O interaction, a crucial aspect to predict magnetic behavior. $LaMnO_3$ were used to compared, data sets were obtained from [24], with $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ three dimensional model obtained by Rietveld adjustment.

For magnetic characterization, the experiment was conducted using a Quantum SQUID MPMS3 model, with a temperature range of 200 to 300 K. The magnetic field strength was 0.01 T (100 Oe). The M–T curve was complete with slope method to differentiates between ferromagnetic, transition and paramagnetic temperature range.

3. RESULTS AND DISCUSSION

As illustrated in Figure 1, a comparison of X–ray diffraction of synthesized $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ (Experimental pattern) and a reference (Simulation pattern) are presented. It was determined that the profile corresponds to orthorhombic crystallographic phase (*Pnma* space group).

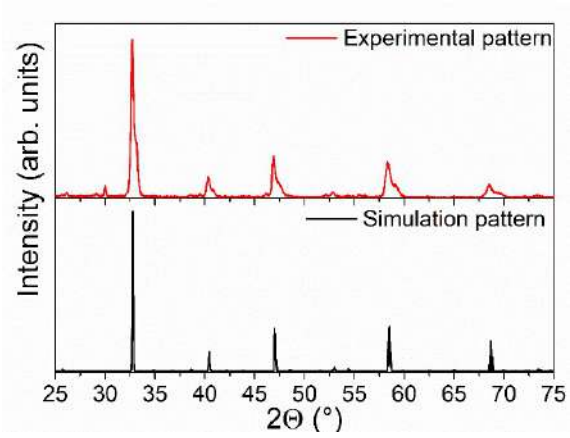


Figure 1. Comparison between the experimental (top) and simulated (bottom) X–ray patterns of $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ compound.

The wide variations observed in the experimental pattern are related to micro deformations on the material. This phenomenon was not considered the ideal setup. Also, 2θ position peaks are the same on both patterns, indicating the presence of an orthorhombic crystalline phase. Simultaneously, the presence of a minimal secondary phase is observed in the experimental pattern, manifested at the 30° peak. This corresponds to calcium carbonate ($CaCO_3$), with a calculated percentage presence of ~2.7. None other phase was identify.

Crystallite size values were calculated using experimental data and the Scherrer model (equation 1). The results are shown in Table 1.

Table 1. Average crystallite size based on Scherrer model.

Average size (nm)	Standard deviation (nm)
97.92	±4.47

The average crystallite size was calculated using the ideal shape with isotropic geometry . However, Figure 2 presents an AFM image, in which the particles exhibit a non–isotropic geometry.

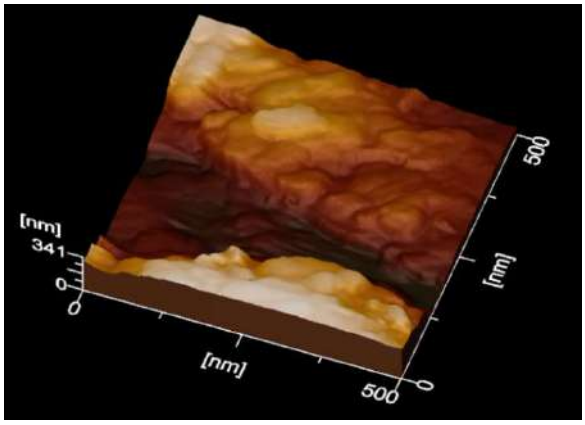


Figure 2. Atomic force microscopy image of $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$.

The detected morphology of the particles were analyzed; the resume is presented in Table 2. Data results indicate the mean diameter (D_A) averaged is subtle minor compared with Scherrer model calculation. As the same, time aspect ratio (A_R) > 1 indicates non ideal spherical shape. Measure particles exhibits a perceptible elongation, suggesting a prism shape referrer to orthorhombic structural phase and synthesis procedure.

Table 2. Morphology data based on atomic force microscopy.

Mean diameter (nm)	Standard deviation (nm)
81.71	±14.73
Aspect ratio (1)	Standard deviation (1)
1.66	±0.28

Rietveld fit adjustment was employed to atomic organization of perovskite and chemical structure of a crystal. As illustrated in Figure 3, the elements are arranged in the rectangular prism shape cell, represented by line over the atoms. It has been represented with a variety of colors to indicate each element; Calcium atom is colored green, lanthanum with blue, manganese with purple and oxygen with red.

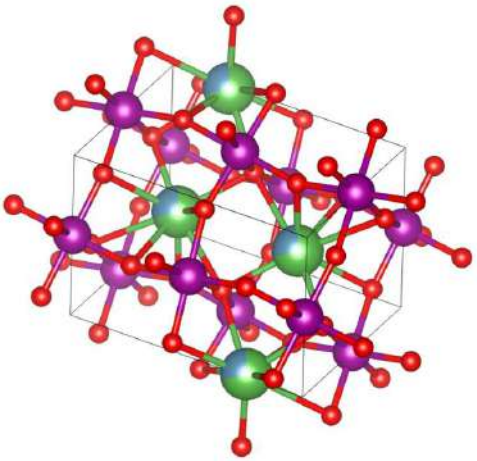


Figure 3. Calculated three-dimensional model of the atomic organization of $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$. It includes calcium / lanthanum (blue/green), manganese (purple) and oxygen (red) atoms.

The MnO_6 octahedron was isolated from the crystallographic unit cell, Figure 4. The simulation was used to calculate the average Mn–O distance along each crystallographic axis (*a*, *b*, *c*). The results are shown in Table 3.

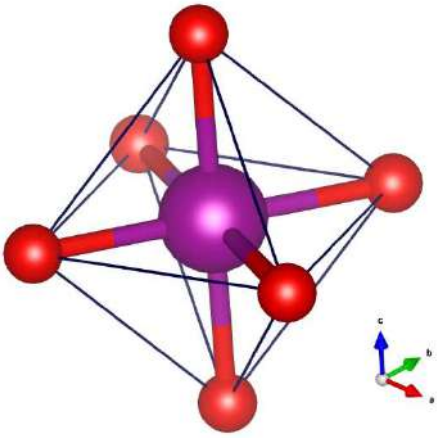


Figure 4. Calculation of the three dimensional model of the MnO_6 octahedron of $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$. The manganese atom corresponds to the center of the octahedron.

Table 3 presents a comparison between simulated $LaMnO_3$ and experimental adjusted $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ octahedra. The results indicates values ranging from 0.19 to 0.218 nm for the base simulated ceramic and from 0.195 to 0.196 nm for the synthetized ceramic.

Table 3. Comparison of the Mn–O atomic distance for simulated $LaMnO_3$ and experimental adjustment $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$

Interatomic distance	$LaMnO_3$ (nm)	$La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ (nm)
Mn–O (*a* axis)	0.19	0.195
Mn–O (*b* axis)	0.218	0.196
Mn–O (*c* axis)	0.196	0.195

The percentage variation of $LaMnO_3$ and $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ over the minimum and maximum Mn–O distances is approximately 15% and 0.5%, respectively, indicating a significant difference over geometric asymmetry. The distance variation of Manganese and Oxygen atom indicates a significant contrasting on electronic density. Furthermore, the partial introduction of Ca causes disorder in the atomic lattice, resulting in reduction of variation in Mn-O distance and promoted a geometric symmetry of the MnO_6 octahedra.

Electron density differences promote a change in the orientation over magnetic momentum, of Mn atom. Meanwhile, $LaMnO_3$ compound has antiferromagnetic order phase because of super exchange interaction by Mn^{+3}; the $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ presents ferromagnetic order due to double exchange interaction by both Mn^{+3}/Mn^{+4}.

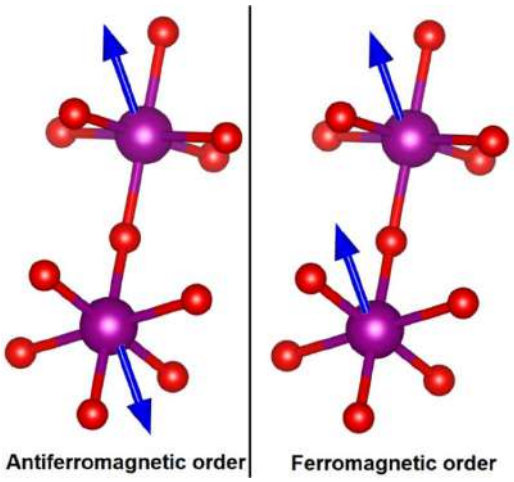


Figure 5. Schematic orientation for magnetic moment of manganese (blue arrow) of $LaMnO_3$ (left) and $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ (right).

As mentioned in previous results, $LaMnO_3$ exhibits a notable distortion in its molecular geometry, suggesting antiferromagnetic behavior. In contrast, $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ exhibits significant molecular symmetry and favors ferromagnetic phase. To reaffirm ferromagnetic order phase in $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ a M-T curve was carried out (Figure 6).

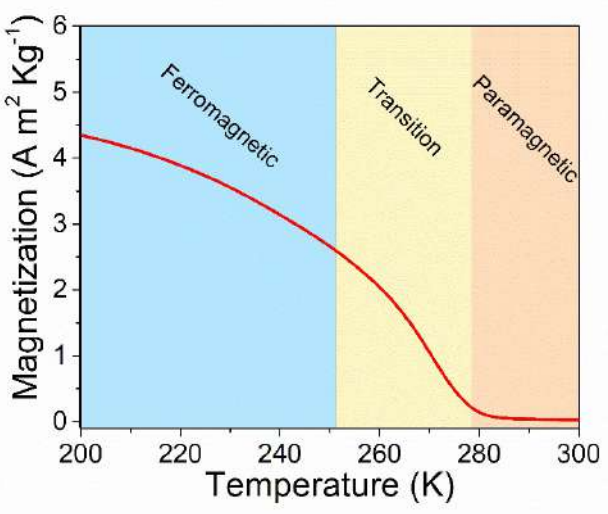


Figure 6. Magnetization versus temperature curve for $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$.

The M–T curve for $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ is typically to ferromagnetic performance, which is consistent with prediction based on previous crystallographic analysis. A significant decrease in magnetization is observed on M-T curve; it is related with disorder by increasing temperature and atomic vibration in Mn atom. This corresponds to a magnetic phase transition from a ferromagnetic ordered phase to a paramagnetic disordered phase; Curie temperature (T_C) indicates this change. Figure 6 includes temperature range encompasses ferromagnetic, transition, and paramagnetic phases. The ferromagnetic range correspond to temperature range below approximately 250 K, while the paramagnetic range extends beyond 280 K. Curie temperatures were detected over ~265 K approximately.

The results are compare with similar compounds based on $LaMnO_3$, on table 4.

Table 4. Comparison of the $LaMnO_3$ compounds with ferromagnetic order phase.

Compound	T_C (K)	Reference
$La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$	265	This work
$La_{0.667}Ca_{0.333}MnO_3$	262.5	[10]
$La_{0.8}Sr_{0.1}Ca_{0.1}MnO_3$	300	[25]
$LaMn_{0.8}Fe_{0.1}Co_{0.1}MnO_3$	100	[25]
$La_{0.8}Sr_{0.2}Mn_{0.85}Ni_{0.15}O_3$	233	[20]
$La_{0.8}Sr_{0.2}Mn_{0.9}Ni_{0.1}O_3$	258	[20]
$La_{0.6}Sr_{0.3}Mn_{1.1}O_3$	367	[8]

The comparison indicates a transition temperature concordance with similar compounds. At the same time, table 4, indicates the variation of magnetic transition range over a controlled chemical formula. It directly impacts on applications, because of temperature range operation.

Subsequently, each compound can be applied in different temperature ranges depending on the purpose. For example, magnetocaloric effects are maximum on transition temperature range. As well as magneto resistive applications operate within the magnetic transition range. $La_{0.667}Ca_{0.333}MnO_3$ and $La_{0.8}Sr_{0.1}Ca_{0.1}MnO_3$ compounds are convenient for room temperature, meanwhile $LaMn_{0.8}Fe_{0.1}Co_{0.1}MnO_3$ is useful for low temperatures application.

In particular, $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ as a working material for magnetic refrigeration and magneto resistance can be use on transition range, which corresponds to temperatures from 250 to 280 K, very similar to room temperature (~298 K).

In the other hand, spintronics and multiferroics have proven effective in the ferromagnetism range. Therefore $La_{0.6}Sr_{0.3}Mn_{1.1}O_3$ can be used at room temperature for this purpose. Therefore, the synthesized compound $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ is useful for the mentioned technological application below 250 K.

4. CONCLUSIONS

X–ray diffraction patterns facilitate the development of a computational model of atomic organization. This model is essential for determining the geometric properties of molecules. $LaMnO_3$ exhibits geometric asymmetry over the MnO_6 octahedra, while $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ demonstrates high geometric symmetry. In this case, the asymmetric Jahn–Teller distortion allows for the prediction of certain magnetic properties.

The prediction, based on symmetry (MnO_6), was confirmed in the M–T curve, because the profile corresponds to the ferromagnetic curve. The results were used to determine the ferromagnetic behavior of the $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ ceramic. It demonstrated that the use of crystallography to predict properties of materials, in particular a ferromagnetic phase order.

$La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ as a working material in various technological applications depends on the magnetic interaction with

temperature, as evidenced by the specified temperature range, presents on figure 7.

In summary, the applications of $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ depend on the physical behavior predicted by an X–ray experiment and verified with an M–T curve.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Materials Research Institute of the National Autonomous University of Mexico (IIM–UNAM) for the experimental activities carried out at the Laboratory of Physicochemical Properties of Nanostructured Ceramic Materials (NUMACEN) and the National Laboratory for Energy Conversion and Storage of the IPN (LNCAE–IPN) for access to their experimental facilities.

In particular, we thank Adriana Tejeda Crúz and Carlos Flores Morales for their technical assistance at the IIM–UNAM.

Armando Reyes Montero thanks PAPIIT DGAPA UNAM (IN115625) project for financial support.

Rafael Guillermo Suárez Nájera (CVU 557326) and Marlene González Montiel (CBF–2025–I–3223) are grateful for the financial support provided by SECIHITI.

REFERENCES

Bao, X., Wang, J., Wu, X., He, C., Luo, H., Bai, Q., Bao, V., Bai, Y., Liu, J., & Zhao, S. (2023). The symmetry aspect of magnetocaloric effect in LaxBi0.3-xCa0.7MnO3 manganites. *Physica B: Condensed Matter*, *671*, 415410. https://doi.org/10.1016/J.PHYSB.2023.415410

Bartuli, C., Jia, F., Zhang, X., Lu, X., Peng, H., Shi, T., Yuan, K., Pang, X., & Han, R. (2025). *Effects of Synthesis Process on the Properties of La 1−x Sr x MnO 3 Materials for Thermal Control Coatings*. https://doi.org/10.3390/coatings15060724

Cadieu, F. J., Chen, L., Li, B., & Theodoropoulos, T. (1999). Room temperature La0.7Sr0.3MnO3 magnetoresistive prototype memory elemen. *Appl. Phys. Lett*, *75*, 3369–3371. https://doi.org/10.1063/1.125354

Conradie, J., Olisah, C., Akpomie, K. G., Malloum, A., Akpotu, S. O., Adegoke, K. A., Okeke, E. S., Omotola, E. O., Ohoro, C. R., & Amaku, J. F. (2024). *Geometric distortions and Jahn-Teller effects in Bis(terpyridine) metal complexes*. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.139840

Das, D., Saha, A., Russek, S. E., Raj, R., Bahadur, D., & Phys Lett, A. (2003). Large magnetoresistance in (La1-xCaxMnO3)1-y:ZrO2 composite. *J. Appl. Phys*, *93*, 8301–8303. https://doi.org/10.1063/1.1556260

Fan, L., Li, Y., Li, F., Li, J., Gu, K., & Liao, Y. (2025). *Enhanced dielectric properties by doping Jahn-Teller Mn ions in ilmenite-type Zn 0.7 Mg 0.3 TiO 3 ceramics*. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2025.109647

Franco, V., Blázquez, J. S., Ingale, B., & Conde, A. (2012). The Magnetocaloric Effect and Magnetic Refrigeration Near Room Temperature: Materials and Models. *Annual Review of Materials Research*, *42*(1), 305–342. https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-062910-100356

Franco, V., Blázquez, J. S., Ipus, J. J., Law, J. Y., Moreno-Ramírez, L. M., & Conde, A. (2018). Magnetocaloric effect: From materials research to refrigeration devices. *Progress in Materials Science*, *93*, 112–232. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.005

Groover, M. P. . (2013). *Fundamentals of modern manufacturing : materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons, Inc.

Guan, F., wei Dang, Z., Cheng, X., & Ping Liao, W. (2023). La 1-x Ca x MnO 3 NTC ceramics for low temperature thermistors with high stability. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, *174*, 111120. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.111120

He, W., Lu, X., Chen, X., Xie, Z., & Zou, Z. (2025). *Room-temperature structure, magnetic, and magnetocaloric properties of La 0.8 Sr 0.2 MnO 3 ceramics by Ni-doped analyzed with first-principles calculations*. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.07.399

Hibble, S. J., Cooper, S. P., Hannon, A. C., Fawcett, I. D., & Greenblatt, M. (1999). Local distortions in the colossal magnetoresistive manganates La0.70Ca0.30MnO3, La0.80Ca0.20MnO3 and La0.70Sr0.30MnO3 revealed by total neutron diffraction. *Journal of Physics Condensed Matter*, *11*(47), 9221–9238. https://doi.org/10.1088/0953-8984/11/47/308

Jahn, H. A., & Teller, E. (1937). *Stability of Polyatomic Molecules in Degenerate Electronic States I-Orbital Degeneracy*. https://royalsocietypublishing.org/

Kim, Y.-J., Park, H.-S., & Yang, C.-H. (2021). ARTICLE Raman imaging of ferroelastically configurable Jahn-Teller domains in LaMnO 3. *Quantum Materials*, 1–11. https://doi.org/10.1038/s41535-021-00361-2

Li, S., Wang, C., Shen, Q., & Zhang, L. (2019). *Substrate-induced strain effect on magnetic and electrical transport properties of La 0·67 Ca 0·33 MnO 3 thin films with varying orientation*. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.03.041

Liedienov, N. A., Fesych, I. V, Prokopenko, V. K., Pogrebnyak, V. G., Pashchenko, A. V, & Levchenko, G. G. (2022). *Giant baroresistance effect in lanthanum-strontium manganite nanopowder compacts*. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168591

Nath, T. K., Rao, R. A., Lavric, D., Eom, C. B., Wu, L., & Tsui, F. (1999). Effect of three-dimensional strain states on magnetic anisotropy of La 0.8 Ca 0.2 MnO 3 epitaxial thin films. In *APPLIED PHYSICS LETTERS* (Vol. 74, Issue 11).

Rodrí Guez-Carvajal, J., Hennion, M., Moussa, F., Moudden, A. H., Pinsard, L., & Revcolevschi, A. (1998). *Neutron-diffraction study of the Jahn-Teller transition in stoichiometric LaMnO3*. *57*, 57.

Salamon, M. B., & Jaime, M. (2001). The physics of manganites: Structure and transport. *REVIEWS OF MODERN PHYSICS*, *73*.

Salazar-Muñoz, V. E., Lobo Guerrero, A., & Palomares-Sánchez, S. A. (2022). Review of magnetocaloric properties in lanthanum manganites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *562*, 169787. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169787

Sheeba Sharon, G., Kumaresavanji, M., Baneto, M., Ravichandran, K., Sofiya, K., Ravi, S., & Ravichandran, A. T. (2025). Targeted A and B site double doping in LaMnO3 perovskites nanoparticles: Tailoring the magnetic behaviour for spintronic applications. *Materials Letters*, *384*, 138040. https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2025.138040

Sturge, M. D. (1968). The Jahn-Teller Effect in Solids. *Solid State Physics - Advances in Research and Applications*, *20*(C), 91–211. https://doi.org/10.1016/S0081-1947(08)60218-0

Tayari, F., Teixeira, S. S., Graca, M. P. F., & Nassar, K. I. (2025). A Comprehensive Review of Recent Advances in Perovskite Materials: Electrical, Dielectric, and Magnetic Properties. *Inorganics*, *13*, 67. https://doi.org/10.3390/inorganics13030067

Wu, S., Fadil, D., Liu, S., Aryan, A., Renault, B., Routoure, J.-M., Guillet, B., Flament, S., Langlois, P., & Méchin, L. (2012). La0.7Sr0.3MnO3 Thin Films for Magnetic and Temperature Sensors at Room Temperature. *Sensors & Transducers.*, p.253-265. https://doi.org/10.34894/VQ1DJA

Zhao, T., Wang, C., Dai, L., Meng, W., Liu, Y., Li, Y., & Wang, L. (2024). *An Amperometric Type NO 2 Sensor Utilizing La 0.7 Sr 0.3 MnO 3−δ-NiO Composite Sensing Electrode*. https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad6295