Año 12, No.2, Vol. 3

Ingeniantes®

Revista de Investigación . Instituto Tecnológico Superior de Misantla

CIREDII 2025

Congreso Internacional de la Red de Investigación Interinstitucional

latindex
ISSN 2395-9452

UNIVERSIDAD DE COLIMA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO®

CECYTCOL
Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del Estado de Colima
Gobierno del Estado

Edición Especial

Ingeniantes latindex

Año 12 / No. 2/ Vol. 3

Información Legal

Ingeniantes, Año 12, No. 2, Vol 3. diciembre 2025 - junio 2026, es una publicación semestral editada y publicada por el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km. 1.8 carretera a Loma del Cojolite, Misantla, Veracruz. México, C.P. 93850, teléfono 01 (235) 323 60 18, página web citt.itsm.edu.mx. Editor responsable: Lic.Jorge Obdulio Gerón Borjas, Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2015-062512501200-203, ISSN 2395-9452, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Centro de Innovación & Transferencia de Tecnología del ITSM, Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas, Km. 1.8 carretera a Loma del Cojolite, Misantla, Veracruz. México, C.P. 93850, fecha de última modificación, 15 de diciembre de 2025.

Actualmente indexada en la base de datos del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal LATINDEX, con número de registro 22843.

Se autoriza cualquier reproducción parcial de los contenidos o imágenes de la publicación siempre y cuando sea sin fines de lucro y para usos estrictamente académicos, citando invariablemente la fuente dando los créditos a los autores del artículo.

El contenido de los artículos publicados es responsabilidad de los autores y no representa el punto de vista del editor de la Revista Ingeniantes.

Directorio

Mtra. María Teresa Meza Caiceros
Director General, ITSM, Veracruz, México

Mtro. Saúl Reyes Barajas
Director Académico, ITSM, Veracruz, México

Lic. Juan Antonio Hernández Morales
Director de Planeación y Vinculación, ITSM, Veracruz, México

Mtra. Aracely Romano García
Subdirectora Académica, ITSM, Veracruz, México

Mtro. Edgar Soto Meneses
Subdirector de Planeación, ITSM, Veracruz, México

Dra. María Cristina López Méndez
Subdirectora de Posgrado e Investigación, ITSM, Veracruz, México

Dr. Federico Perera Zapata
Subdirector de Vinculación, ITSM, Veracruz, México

Lic. Reyna Villalva Velasco
Subdirectora de Servicios Administrativos, ITSM, Veracruz, México

Cuerpo Editorial

Editor General
Instituto Tecnológico Superior de Misantla
Editor
Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas
Coeditor
Lic. Erik Balderas González

Administración

MII. Mayra Lizeth Méndez Oloarte

Propiedad Intelectual

Centro de Innovación & Transferencia de Tecnología
Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas

Sistemas

Administrador de Sistemas
Webmaster
L.I. Ana Marcela Gutiérrez Romero

Distribución

Publicación electrónica disponible en
citt.itsm.edu.mx/ingeniantes
Correo electrónico:
revista.ingeniantes@itsm.edu.mx
https://www.latindex.org/latindex/ficha/22843

Ingeniantes

Comité de Revisión

Dr. Luis Alberto Morales Rosales, UMSNH	SNII
Dr. David Lara Alabazares, ITSM	SNII
Dr. Gregorio Fernández Lambert, ITSM	SNII
Dr. Javier Esquer Peralta, UNISON	SNII
Dr. Francisco Reyes Zepeda, IEA-UAT	SNII
Dr Eduardo Mael Sánchez Coronado, ITCV	SNII
Dr. Jesús Antonio Álvarez Cedillo, IPN	SNII
Dr. Roberto Ángel Meléndez Armenta, ITSM	SNII
Dr. Adolfo Preciado Quiroz, ITSDZ	SNII
Dr. José Luis Marín Muñiz, CV	SNII
Dr. Julio César Chacón Hernández, UAT	SNII
Dr. Eddy Sánchez de la Cruz, ITSM	SNII
Dra. María Cristina López Méndez, ITSM	SNII
Dr. Luis Carlos Sandoval Herazo. ITSM	SNII
Dr. José de Jesús Ibarra Montalvo, ITSDZ	SNII
Dr. Andrés Blanco Ortega, CENIDET	SNII
Dr. Juan Carlos González Hernández, ITM	SNII
Dr. Heriberto Esteban Benito, ITSNa	SNII
Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña, UTCV	SNII
Dr. Sergio Aurelio Zamora Castro, UV	SNII
Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles, CENIDET	SNII
Dr. Daniel Martínez Navarrete, ITSAV	SNII
Dra. Laura Celina Ruelas Monjardín, UV	SNII
Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña, UTCV	SNII
Dr. Sergio Fabian Ruiz Paz, UNPA	SNII
Dr. Arturo Pacheco Espejel, IPN	SNII
Dr. Cuauhtémoc Guerrero Dávalos, UMSNH	SNII
Dr. Francisco Reyes Zepeda, IEA-UAT	SNII
Dr. José Pastor Rodríguez Jarquín, ITO	SNII
Dr. Luis Enrique García Santamaría, ITSM	SNII
Dr. Alan Rico Barragán, ITSM	SNII
Dra. Alicia Martínez Rebollar, CENIDET	SNII
Dr. Humberto Raymundo González Moreno, ITSM	SNII
Dr. Alfredo Alberto Morales Tapia, UV	SNII
Dra. María Victoria Carreras Cruz, UP	
Dr. Ramón Álvarez López, UDG	
Dr. Gustavo Martínez Castellanos, ITSM	
Dr. Arturo Cabrera Hernández, ITSM	
Dr. Saúl Santiago Cruz, ITSM	
Dr. Joel Pozos Osorio, HUB2i	
Dra. Ana Lilia Sosa y Durán, ITSM	
Dr Guillermo Alfredo Arrioja Carrera, UX	
Dr. Modesto Raygosa Bello, ITO	
Dr. Luis Alberto Nava Ordoñez, UPAEP	
Dr. Irahan Otoniel José Guzmán, ITSM	
Dr. Luis Mejía Macario, ITSM	
Dra. María Guadalupe Montes de Oca, ITSM	
Dr. Marcos Jesús Villaseñor Aguilar, UPG	
Dr. Juan Carlos Rodríguez Campos, ITESI	
Dra. Julia Patricia Melo Morín, ITSP	
Dra. Wendy Guadalupe Báez García, ITSM	
Dr. Alán Rico Barragán	
M.C. Clovis Nchikou, ITNL	
M.I. Fernando Jurado Pérez, ITESI	
M.I.I. Aarón Montiel Rosales, ITSPR	
M.S.C. Daniela Lizbeth Hernández Sánchez, ITSM	
M.I.I. Nayeli Montalvo Romero, ITSPR	
M.I.I. Gema del Carmen Jiménez Gómez, ITSAV	
M.I.I. Mario Pérez Acosta, ITSM	
M.I.I. Leonardo Martínez Lara, ITSAV	
M.S.C. Arnulfo Gamaliel Hernández González, ITSM	
M.I.M. Jorge Roa Díaz, ITSM	
M.C. Vladimir Zagoya Juarez, ITSM	
M.I.A. Julio Cesar Martínez Hernandez, ITSH	
M.G.C. Eduardo Gutierrez Almaraz, ITSM	
M.I.I. Giovanni Luna Chontal, ITSM	
M.A. Luz del Carmen Muñoz Palacios, UTCV	
M.C. Joel Maurilio Morales García, ITSM	
M.V.T. Oscar Moreno Vázquez, ITSM	
M.S.C. Cecilia Irene Loeza Mejía, ITSM	
M.I.E. Heber Bernabé Pérez Márque, ITESI	
M.S.C. Galdino Martínez Flores, ITSM	
M.C.C. Nelly Beatriz Santoyo Rivera, ITESI	

Comité de Revisión del CONGRESO INTERNACIONAL DE LA RED DE INVESTIGACIÓN INTERINSTITUCIONAL

Dr. Jorge Flores Troncoso - UAZ SNII
Dr. Fernando Pech May - ITSR SNII
Dr. Ansel Yoan Rodríguez González - CICESE-UAT
Dr. Ismael Edreín Espinosa Curiel - CICESE-UAT
Dr. Lino Alberto Rodríguez Coayahuitl - CICESE-UAT
Dr. Joel Antonio Trejo Sánchez - CIMAT
Dr. Miguel Ángel Álvarez Carmona - CIMAT
Dr. Humberto Pérez Espinosa - INAOE
Dr. J. Octavio Gutiérrez García - ITAM
Dr. Juan Arturo Nolazco Flores - ITESM
Dr. Daniel Fajardo Delgado - TecNM/Cd. Guzmán
Dr. Julio Alberto García Rodríguez - TecNM/Cd. Guzmán
Dr. Marco Antonio Meza Aguilar - TecNM/Cd. Guzmán
Dr. Ma. Gpe. Sánchez Cervantes - TecNM/Cd. Guzmán
Dr. José Abel Chocoteco Campos - TecNM/Cd. Guzmán
Dr. Ramón Chávez Bracamontes - TecNM/Cd. Guzmán
Dr. Gonzalo Partida Ochoa - TecNM/Cd. Guzmán
Dr. Sergio Sandoval Pérez - TecNM/Cd. Guzmán
Dr. Jaime Jalomo Cuevas - TecNM/Cd. Guzmán
Dr. Ramiro Rodríguez Pérez - TecNM/Cd. Guzmán
Dr. Raquel Ochoa Ornelas - TecNM/Cd. Guzmán
Dr. María Mojarro Magaña - TecNM/Cd. Guzmán
Dr. Alejandra García Becerra - TecNM/Cd. Guzmán
Dr. Rubén Jesús Pérez López - TecNM/Cd. Guzmán
Dr. Alejandro Rodríguez Mendez - TecNM/Cd. Guzmán
Dr. Patricia Elizabeth Figueroa Millán - TecNM/Colima
Dr. Elena Elsa Bricio Barrios - TecNM/Colima
Dr. Noel García Díaz - TecNM/Colima
Dr. Santiago Arceo Díaz - TecNM/Colima
Dr. Jorge Armando Gutiérrez Valencia - TecNM/Colima
Dr. Armando Gaytán Godinez - TecNM/Colima
Dr. Dora Angélica Correa Fuentes - TecNM/Colima
Dr. Francisco Cervantes Zambrano - TecNM/Colima
Dr. Jesús Alberto Verduzco Ramírez - TecNM/Colima
Dr. Silvia Rolón Llamas - TecNM/Colima
Dr. Iván Castillo Zúñiga - TecNM/El Llano
Dr. Oscar Mario Rodríguez Elias - TecNM/Hermosillo
Dr. Luis Antonio Gama Moreno - TecNM/Tlajomulco
Dr. Marcos Eduardo Gonzalez Trevizo - UABC
Dr. José Luis López Martínez - UADY
Dr. Leonel Soriano Equigua - UCol
Dr. Ismael Amezcua Valdovinos - UCol
Dr. Raúl Teodoro Aquino Santos - UCol
Dr. Pablo Armando Alcaraz Valencia - UCol
Dr. Pedro César Santana Mancilla - UCol
Dr. José Román Herrera Morales - UCol
Dr. Fermín Estrada González - UCol
Dr. Armando Román Gallardo - UCol
Dr. Margarita Glenda Mayoral Baldivia - UCol
Dr. Omar Álvarez Cárdenas - UCol
Dr. Fernando Rodríguez Haro - UCol
Dr. Daniel Alfonso Verde Romero - UCol
Dr. Juan Miguel González López - UCol
Dr. Efraín Villalvazo Laureano - UCol
Dr. Silvia Fajardo Flores - UCol
Dr. Miguel Ángel Duran Fonseca - UCol
Dr. Ernesto Navarro Álvarez - UCol
Dr. Oliver Mendoza Cano - UCol
Dr. Alberto Manuel Ochoa Brust - UCol
Dr. Jorge Gudiño Lau - UCol
Dr. Marco Antonio Pérez González - UCol
Dr. Luis Alberto Contreras Aguilar - UCol
Dr. Jaime Arroyo Ledesma - UCol
Dr. Erik Eduardo Vázquez Fernández - UCol
Dr. Mónica Cobian Alvarado - UCol
Dr. Juan Antonio Guerrero Ibáñez - UCol
Dr. José Luis Álvarez Flores - UCol
Dr. César Augusto Vázquez Jiménez - UCol
Dr. Antonio Concha Sánchez - UCol
Dr. Mayrén Polanco Gaytán - UCol
Dr. Laura Sanely Gaytán Lugo - UCol
Dr. Fermín Marcelo Rubén Maciel Barboza - UCol
Dr. Rafael Julio Macedo Barragán - UCol
Dr. Víctor Hugo Castillo Topete - UCol
Dr. Adriana Lorena Íñiguez Carrillo - UdeG
Dr. Himer Avila George - UdeG
Dr. Jesús Arturo Pérez Díaz - nan
Dr. Diego Uribe Agundis - nan
Dr. Eduardo Flores Gallegos - nan
Dr. Juan Pablo Serrano Rubio - nan
Dr. Víctor Uriel Farías Moreno - nan
Dr. Vladimir Veniamin Cabañas Victoria - nan
M.C. Karla Alejandra Jiménez Martínez - TecNM/ITESO
M.C. Juan Francisco Palomino Bernal - TecNM/Cd. Guzmán
M.C. Mayra Soto Macias - TecNM/Cd. Guzmán
M.C. Cynthia Alejandra Martínez Pinto - TecNM/Cd. Guzmán
M.C. Olimpo Lua Madrigal - TecNM/Colima
M.C. Ramona Evelia Chávez Valdez - TecNM/Colima
M.C. Sara Sandoval Carrillo - UCol
M.C. Tiberio Venegas Trujillo - UCol
M.T.I. Brissa Angélica Burgos Sánchez - TecNM/Cerro Azul
M.T.I. Luis Raymundo Arán Sánchez - TecNM/Cerro Azul
M.E. Juan Carlos Anguiano Rosas - TecNM/Cerro Azul
M.I. Carmen Julia Rosas Aguilar - TecNM/Cerro Azul

Ingeniantes

03 12 22 29 37

Contenido

Distribución geoestadística de la accesibilidad vial en la Zona Conurbada Colima-Villa de Álvarez, México _____ 03
Isaac Farías-Moreno; Peter Chung-Alonso; Alicia Cuevas-Muñiz; María Silvia del Rocío Covarrubias-Ruesga; Jorge Armando Gutiérrez-Valencia, Tecnm Nacional de México Instituto Tecnológico de Colima

Modelo de Innovación didáctica con impacto social para la Conservación del Patrimonio 12
Fabiola Colmenero Fonseca https://orcid.org/0000-0003-1901-2725, Universidad Autónoma de Coahuila; Ramiro Rodríguez Pérez https://orcid.org/0009-0009-1879-3970; Juan Francisco Palomino Bernal, https://orcid.org/0000-0002-5561-7943, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán; Daniel Ruíz López https://orcid.org/0009-0009-5804-2493, Javier Cárcel-Carrasco, Universitat Politécnica de Valéncia

Emprendimiento regenerativo y sostenibilidad crítica en la formación universitaria _____ 22
Juan Francisco Palomino Bernal, https://orcid.org/0000-0002-5561-7943, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, Fabiola Colmenero Fonseca https://orcid.org/0000-0003-1901-2725, Universidad Autónoma de Coahuila; Elsa Ivette Aldana Ornelas, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán; Andrés Salas Montoya, Universidad Nacional de Colombia

Impulso a la producción sostenible mediante soluciones energéticas en comunidades artesanales a través de la Ciencia y Tecnología _____ 29
Fabiola Colmenero Fonseca https://orcid.org/0000-0003-1901-2725, Universidad Autónoma de Coahuila; Juan Francisco Palomino Bernal https://orcid.org/0000-0002-5561-7943, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán; José Manuel Castro Aceves, https://orcid.org/0009-0009-0671-8199; Amparo Borell; Rut Benavente, Universitat Politécnica de Valéncia

Automatización y Detección Temprana de Amenazas Meteorológicas _____ 37
Omar Álvarez Cárdenas; Gilles Arfeuille; Leonid Alberto Ramos Nando, Universidad de Colima; Fernando Pech May Tecnológico Nacional de México / Campus de los Ríos; Margarita Glenda Mayoral Baldivia, Universidad de Colima

Análisis exploratorio del desempeño de esquemas de control clásico y avanzado. Caso de estudio: Reactores para la producción de bioetanol _____ 44
Elena Elsa Bricio-Barrios, Tecnológico Nacional de México / campus de Colima; Héctor Hernández-Escoto; Fernando López-Caamal; Salvador Hernández-CastroUniversidad de Guanajuato; Santiago Arceo-Díaz, Tecnológico Nacional de México / campus de Colima

Implementación de un dispositivo IoT para el monitoreo del dolor en niños a través de variables fisiológicas _____ 52
Verónica Guzmán Sandoval; Miguel Sebastián Frausto Zapata; José Enrique Guerrero Pérez; Juan Diego Terriquez Polanco; Pedro César Santana Mancilla, Universidad de Colima

Automatización de mediciones para la obtención de diagramas de Bode con control simultáneo de instrumentos mediante MATLAB _____ 61
Willy Omar Torres Melchor; Ramón Chávez Bracamontes;Julio Isaac Flores Figueroa; Jaime Jalomo Cuevas, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán

Sistema hibrido con control PI para la temperatura en un deshidratador solar de coco __ 71
Roberto Tapia Torres; Santiago Arceo Díaz; Flabio Darío Mireles Delgado, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas; ; Elena Elsa Bricio Barrios; Ramona Evelia Chávez Valdez, Tecnológico Nacional de México, campus Colima

Construcción e instrumentación de un edificio a escala pequeña para simulación de sismos por medio de modelos matemáticos _____ 78
Irving Naim Rodríguez Barragán; Antonio Concha Sánchez, Universidad de Colima, Colima

86 92 105 113 122

Pronóstico del Consumo de Energía Eléctrica en Edificio Inteligente _____ 86
Yianko de Jesús Castellanos Pol Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Unidad Académica Tepic; Ansel Yoan Rodríguez González; Yoan Martínez López, Universidad de Córdova

Sistema IoT-MQTT para la monitorización y notificación de alertas microclimáticas en cultivos agrícolas _____ 92
Carlos Eduardo Rincón García, Patricia Elizabeth Figueroa Millán, Ismael Amezcua Valdovinos, Ramona Evelia Chávez Valdez; J. Reyes Benavides Delgado, Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán

CitruScan: Un Enfoque Basado en Redes Neuronales para Proteger la Producción de Limones _____ 105
Juan A. Guerrero-Ibáñez; Juan Contreras-Castillo, Universidad de Colima

Comparativa de eficacia de los modelos de redes neuronales convolucionales UNet y PSP-Net en la segmentación semántica de las hojas y frutos de plantas de jitomate_____ 113
Juan Pablo Guerra Ibarra, Tecnológico Nacional de México campus Zamora; Francisco Javier Cuevas de la Rosa, Centro de Investigaciones en Óptica A.C; Lorenzo Rene Rojas Ruiz, Tecnológico Nacional de México, campus Zamora

Preservación de la diversidad en algoritmos evolutivos mediante la asignación de género 122
Luis Antonio Ibarra Flores; Lino Alberto Rodríguez Coayahuitl, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada / Unidad Académica Tepic.

128 138 148 159 167

Monitoreo de la calidad del aire utilizando imágenes satelitales y SIG: Aplicación de Sentinel-5P y QGIS en Manzanillo, Colima, durante el Incendio del Cerro del Toro en el mes de mayo, 2024 _____ 128
Yolanda Rosenda Monzón Herrera; Raúl Teodoro Aquino Santos, Mayren Polanco Gaytan, Universidad de Colima

Herramientas digitales para la teledetección de inundaciones en el estado de Colima utilizando imágenes satelitales _____ 138
Raúl U. Renteria Flores, Raúl T. Aquino Santos, Jesús López de la Cruz, Universidad de Colima; Joan Saladich Cubero , Geoskop Climate Intelligence

Intelligent Agents Applied to E-Commerce: A Comparative Study of AutoGen and Semantic Kernel _____ 148
Alba Beth-birai López Aguilar; Jesús Eduardo Ceballos Contreras; Walter Alexander Mata López; Jesús Alberto Verduzco Ramírez; Víctor Hugo Topete Castillo, Universidad de Colima

SmartReview: Revisión Inteligente de Literatura Científica Asistida Localmente _____ 159
Pedro Antonio Ibarra Facio; Oliver Sánchez Corona;Walter Alexander Mata López; Mónica Cobián Alvarado; Carlos Alberto Torres Cantero, Universidad de Colima

Predicción de glucosa en niños con DMT1 en ventanas de 30 minutos mediante XGBoost y simulación fisiológica _____ 167
Olaf Gustavo Sandoval Vázquez; Raquel Ochoa Ornelas; Julio Alberto García Rodríguez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán

173 182 189 197

Detección del Virus de la Mancha Anular en la Papaya Mediante una Red Neuronal Convolucional _____ 173
Cristian Armando Larios Bravo; Nydia Naomi Olmos Romero; Jesús Alberto Verduzco Ramírez; Luis Eduardo Morán López, Universidad de Colima

Identificación de plagas y cultivos enfermos con aplicación de Inteligencia Artificial usando YOLOv5 _____ 182
Edilberto Vega Lopez; María Guadalupe Pineda Arizmendi, Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco; Irvin Uriel Nopalera Ángeles, Universidad Autónoma del Estado de México; Brenda Sunuami González Lopez, Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco

Redes Convolucionales para Agricultura: MobileNetV3 vs. InceptionV3 en el Reconocimiento de Enfermedades en Fresas _____ 189
Ever Essaú Rodríguez Sandoval; Raquel Ochoa Ornelas; Ansel Yoan Rodríguez González, Tecnológico Nacional de México / Ciudad Guzmán

Plataforma Web de Firmado Digital basada en Infraestructura de Clave Publica para la Transformación hacia la Universidad Digital _____ 197
Jaziel Isai Anguiano Mariz; Ismael Amezcua Valdovinos; Patricia Elizabeth Figueroa Millán, Tecnológico Nacional de México / Campus Colima

204

214

225

235

Sistema de Traducción Automática del Español Mexicano a Glosa de la Lengua de Señas Mexicana mediante Aprendizaje Profundo _____ 204
Cristian M. Torres-Martínez; Vanessa Abigail Huerta-García; Joel A. Trejo-Sánchez, Tecnológico Nacional de México / Ciudad Guzmán; Jesús Ezequiel Molinar-Solis, Centro de Investigación en Matemáticas; Daniel Fajardo-Delgado, Tecnológico Nacional de México / Ciudad Guzmán

Monitorización IoT de Temperatura y Humedad en Agricultura Inteligente mediante Sistema Web Responsivo _____ 214
Armando Roman Gallardo, Jose Roman Herrera Morales, Sara Sandoval Carrillo and Armando Román Gallardo Heredia, Universidad de Colima

Diseño y construcción de una mesa sísmica de dos grados de libertad _____ 225
Diego Armando Ramírez Zúñiga; Antonio Concha Sánchez; Jaime Arroyo Ledesma, Universidad de Colima

Propuesta conceptual de una arquitectura para un asistente de predicción de glucosa (GPA) basada en la revisión de la literatura_____ 235
Dante Heriberto González González; Pedro Antonio Ibarra Facio; Luis Eduardo Morán López; Walter Alexander Mata López, Universidad de Colima

Multidisciplinario
e
ingenierías
Ingeniantes

Distribución geoestadística de la accesibilidad vial en la Zona Conurbada Colima-Villa de Álvarez, México

Colaboración
Isaac Farías-Moreno; Peter Chung-Alonso; Alicia Cuevas-Muñiz; María Silvia del Rocío Covarrubias-Ruesga; Jorge Armando Gutiérrez-Valencia, Tecnm Nacional de México Instituto Tecnológico de Colima

Fecha de recepción: 27 de novimbre de 2025
Fecha de aceptación: 11 de diciembre de 2025

RESUMEN: La accesibilidad urbana es un indicador de la integración efectiva del territorio urbano. En el marco de las ciudades sostenibles, la accesibilidad define el potencial de interacción entre centros de población y el espacio urbano, así como su conectividad, vitalidad y salubridad. Esta investigación propone una metodología enfocada al análisis geoestadístico de la accesibilidad a escala vial, que incluye variables socioambientales, de calidad ambiental y de la eficiencia morfológica. Su aplicación es en la Zona Conurbada Colima-Villa de Álvarez, donde se detectó una tendencia semi radial, irregular y heterogénea de la accesibilidad. Se identificación de zonas altamente conectadas y sectores aislados, brindando criterios para su integración efectiva, así como parámetros para el desarrollo urbano sustentable.

PALABRAS CLAVE: Accesibilidad urbana, Ciudades Sostenibles, Análisis espacial, Indicadores Urbanos, Sistemas urbanos.

ABSTRACT: Urban accessibility is an indicator of the effective integration of urban areas. Within the framework of sustainable cities, accessibility defines the potential for interaction between population centers and urban space, as well as their connectivity, vitality, and health. This research proposes a methodology focused on the geostatistical analysis of accessibility at the road scale, which includes socio-environmental variables, environmental quality, and morphological efficiency. Its application is in the Colima-Villa de Álvarez Metropolitan Area, where a semi-radial, irregular, and heterogeneous accessibility trend was detected. Highly connected zones and isolated sectors are identified, providing criteria for their effective integration, as well as parameters for sustainable urban development.

KEYWORDS: Urban accessibility, Sustainable cities, Spatial analysis, Urban indicators, Urban systems.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo y la expansión acelerada de los asentamientos humanos a nivel global, representan retos para la funcionalidad de las ciudades, sobre todo en ciudades en procesos de conurbación/metropolización, donde habita una de cada tres personas del planeta [1].

En México, las ciudades en el Sistema Urbano Nacional dan sustento a 87.3 millones de habitantes, o al 69.28% de la población nacional [2], donde el 85.45% de estos se concentran en zonas metropolitanas, cuya di-

námica de crecimiento acelerado propicia la desigualdad, marginación y aislamiento en zonas o sectores vulnerados [3]. La presente investigación abona al ODS 11 «Ciudades y Comunidades Sostenibles» y 13 «Acción por el clima», al plantear métodos para analizar la accesibilidad como un índice de la eficiencia y compacidad urbana, cuyos efectos influyen en las dinámicas cotidianas de movilidad, y sobre la huella de carbono requerida para conectar áreas espacial funcionalmente desvinculadas.

La accesibilidad es una cualidad que define el potencial de interacción dentro de un sistema espacial [3, 4]. La accesibilidad urbana denota la integración y vinculación entre los centros de población y sus entornos, lo cual influye en la conectividad, vitalidad y salubridad integral en las ciudades [4, 5]. En los estudios urbanos se han definido los factores ambientales que promueven la accesibilidad, cuya naturaleza abarca la cercanía y diversidad de actividades así como preferencias perceptuales/subjetivas que condicionan la intensidad y frecuencia del uso de zonas o vías del espacio urbano [4, 6].

En términos espaciales, las ciudades poseen patrones distributivos y jerarquías asociados a la accesibilidad, definiendo su eficiencia para cohesionar los territorios, o, para identificar las áreas aisladas, marginadas y vulnerables [4]. Los estudios urbanos contemporáneos sobre la accesibilidad se bifurcan en el análisis de 1) la integración funcional de puntos de interés en el territorio urbano y 2) los aspectos físico-ambientales que influyen sobre la preferencia e intensidad de uso del espacio urbano, con diversas escalas (macro/micro) de análisis.

La vinculación espacial efectiva entre centros de población y el espacio urbano, ha sido uno de los enfoques teórico-metodológicos con un mayor impacto y consolidación, derivando en las «ciudades de 15 minutos», donde se parte del supuesto de una distancia máxima (~600-800 metros), dentro de la cual debe existir la disponibilidad de satisfactores vitales para las actividades cotidianas de la vida urbana. Con dichos principios, en trabajos recientes [5, 7, 8] se analizan los patrones espaciales para la articulación de los territorios urbanos, basada en la proximidad, densidad y diversidad de los comercios, servicios y equipamientos que dan servicio a la población, estableciendo núcleos socio-ambientales sostenibles y eficientes.

La identificación de factores que influyen en la accesibilidad a nivel perceptual y subjetivo, se aborda en investigaciones recientes [3, 4, 9, 10], aportando al entendimiento de dinámicas de movilidad e interacción socioespaciales, a partir de los atributos que definen la calidad, el confort y la vitalidad del entorno urbano. Allí, destaca la influencia positiva de la diversidad de actividades, la presencia de la naturaleza en el espacio urbano, y la funcionalidad de los componentes físicos para la movilidad segura.

La conectividad espacial del territorio urbano se evalúa en trabajos recientes [10-14], donde la accesibilidad, caminabilidad, eficiencia y las preferencias del desplazamiento humano son asociadas con indicadores morfológicos que definen la jerarquía de cada segmento vial en un sistema urbano. En ellos, se asocia el alto desempeño espacial-morfológico de la red vial respecto al uso/frecuencia del espacio urbano, donde se establecen la eficiencia de índices de la conectividad, centralidad y compacidad vial como predictores de la accesibilidad y la integración de los territorios, destacando con ello la importancia de la estructura vial urbana.

Bajo la premisa de la heterogeneidad o desigualdad en accesibilidad urbana, esta investigación tiene por objetivo analizar la distribución espacia de la accesibilidad; ello, considerando la Zona Conurbada Colima-Villa de Álvarez como área de estudio, tomando su tejido vial como conjunto de vectorial objetos para el análisis geoestadístico. Se consideró la aplicación de una metodología [4], en la cual se incorporan indicadores sobre: 1) La articulación social; 2) La calidad ambiental y; 3) La eficiencia espacial de la red vial, para la integración del Índice de Accesibilidad del Espacio Vial Urbano [IAEVU], y un factor de ajuste de acuerdo a la distancia al Espacio Público [IAAEVU]. Los resultados permitieron identificar patrones, tipologías y jerarquías del área de estudio con base en su accesibilidad.

MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolla en la Zona Conurbada Colima-Villa de Álvarez, que alberga 265,770 habitantes en 7013.4ha [14-16]. El análisis se realizó con base en los 16,781 tramos viales como Unidad Básica de Análisis (UBA). La Figura 1 muestra el área de estudio y puntos de interés dentro del entorno urbano.

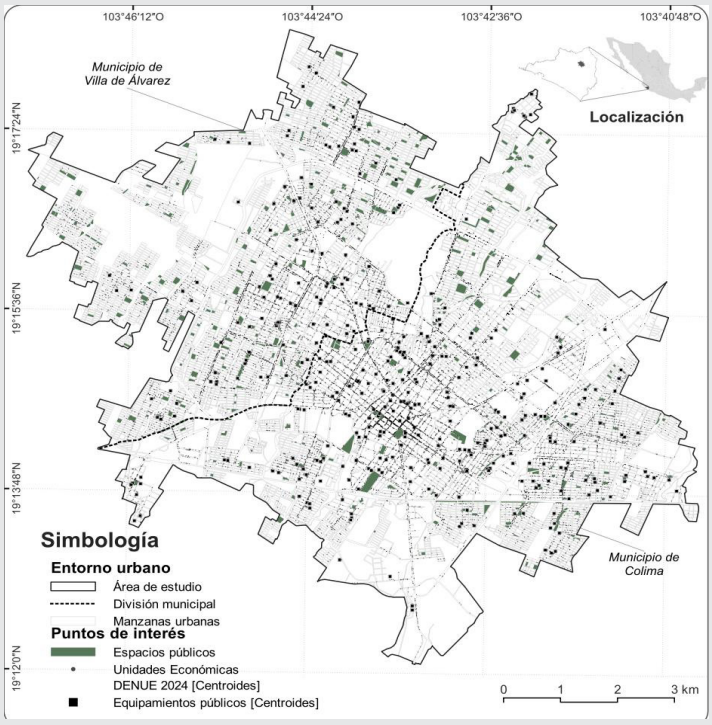


Figura 1. Área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2 ilustra la metodología, indicando sus etapas, datos, procesos y productos.

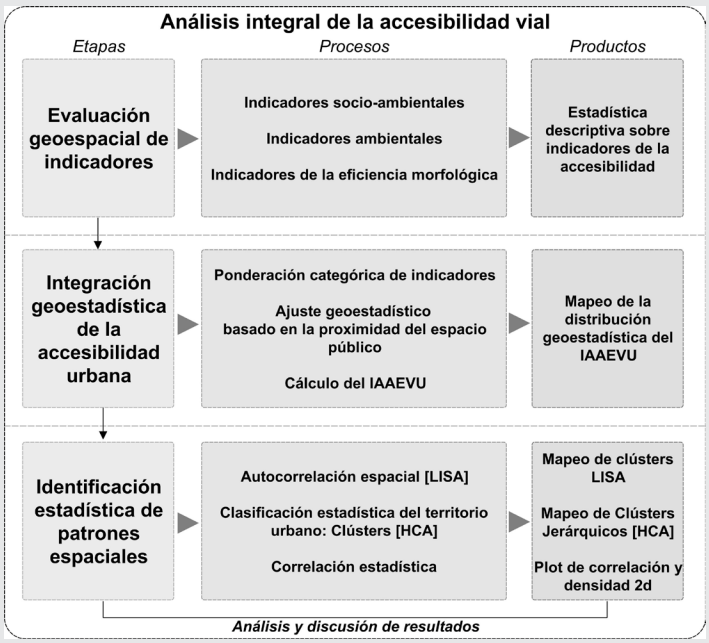


Figura 2: Diagrama metodológico.
Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo del índice se integran variables que definen la accesibilidad urbana [4, 6, 14] en tres categorías: a) socio-ambientales; b) calidad ambiental y c) eficiencia espacial-morfológica Tabla 1.

Tabla 1. Variables del índice de accesibilidad vial.

Categoría	Indicador	Fuente
Indicadores socio-ambientales (S)	S.1 Densidad poblacional	CPV INEGI [15]
	S.2 Densidad comercial	DENUE [17]
	S.3 Proximidad	MGN INEGI [16]
Indicadores de la calidad ambiental (A)	A.1 Calidad térmica	Banda 10 USGS [18]
	A.2 Densidad arbórea	Bandas 4 y 5 USGS [18]
	A.3 Pendiente vial promedio	DEM INEGI [19]
Indicadores de la eficiencia morfológica (M)	M1. Centralidad	Calculado mediante sDNA [20]
	M2. Intermediación	
	M3. Conectividad	

Fuente: Elaboración propia con base en [4].

El proceso geoestadístico aplicado para evaluar el desempeño de cada tramo vial se define en la Ecuación 1.

$$DV_i = \sum_{U \in A(v;r)_i} V_X(U) \qquad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:
DV_i: Desempeño de la variable V en la UBA i.
$U \in A(v;r)_i$: Unidades (puntos, polígonos, pixeles), dentro del área A, definida por un vector v y radio de influencia r de la UBA i.
$V_X(U)$: Valor de variable V en las unidades U.

Indicadores socio-ambientales

Siendo predictores del potencial de la interacción humana en el espacio urbano, se consideró la densidad poblacional, densidad comercial y la proximidad institucional como variables; ellas, fueron recuperadas del CPV, DENUE y MGN de INEGI [15, 16, 17].

Indicadores de la calidad ambiental

Como indicadores sobre el confort y/o facilidad del desplazamiento humano, fueron incorporadas variables de la calidad térmica, densidad arbórea y pendientes, que definen la habilitación ambiental para la interacción. Sus datos se recuperaron de datos ráster del proyecto Landsat 8-9-L2 [18] y del Modelo de Elevación Digital de INEGI [19]. La Ecuación 2 define la operación para la obtención del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):

$$NDVI = \left(\frac{B5 - B4}{B5 + B4}\right) \qquad \text{Ec. (2)}$$

La ecuación 3 define la operación para el cálculo de la temperatura (°C).

$$T_{°C} = \Big(\big(B10(0.003418)\big) + 149\Big) - 273.15 \qquad \text{Ec. (3)}$$

Dónde:
B4: Banda 4 Landsat-8-9-L2 (Rojo)
B5: Banda 5 Landsat-8-9-L2 (NIR)
B10: Banda 10 Landsat-8-9-L2 (TIR)

Indicadores de la eficiencia morfológica

Emanadas de la teoría de grafos, con énfasis en el análisis de sistemas vectoriales, las variables de centralidad, intermediación y conectividad son predictores de micro escala sobre el alcance de una red espacial. Para su cálculo, fue utilizado Street Design Network Analysis (sDNA) [20, 21], considerando la totalidad de tramos viales, con una distancia radial de entrada de 600 metros.
La Ecuación 4 define la centralidad:

$$Centralidad_i = \frac{\sum_{y \in R_z} d_M(x,y) W(y) P(y)}{\sum_{y \in R_z} W(y) P(y)} \qquad \text{Ec. (4)}$$

La Ecuación 5 define el cálculo de la intermediación, o la frecuencia en la que un vector es ruta más corta:

$$Intermediación_i = \sum_{y \in N} \sum_{z \in R} W(y) W(z) P(z) OD(y,z,x) \qquad \text{Ec. (5)}$$

La Ecuación 6 define la conectividad vial.

$$Conectividad_i(x) = \sum_{y \in R_x} P(y \in z) \qquad \text{Ec. (6)}$$

Dónde:
$d_M(x,y,z)$: Distancia métrica entre dos vectores x, y, z.
R: Radio de cálculo.
P: Nodos dentro del radio efectivo R.
N. Número de vectores en el grafo.
V: Número de nodos en el grafo.
W: Ponderación vectorial.

Integración del Índice de Accesibilidad

El Índice de Accesibilidad Vial del Espacio Urbano (IAEVU), se calculó a partir de la ponderación categórica de las variables, de acuerdo al ajuste descrito la Tabla 2.

Tabla 2. Ajuste categórico; IAEVU

Categoría	Ponderación (f)
Socio-ambiental	1.00
Calidad ambiental	0.70
Eficiencia morfológica	0.45

Fuente. Elaboración propia.

La Ecuación 7 define la obtención del IAEVU.

$$IAEVU_i = \frac{V_a\bar{S}_i + V_a\bar{A}_i + V_a\overline{M_i}}{3} \quad \text{Ec. (7)}$$

Dónde:
$AEVU_i$: IAEVU sobre la UBA i.
V_a: Factor de ajuste por categoría.
$\bar{S}_i, \bar{A}_i, M_i$. Promedio categórico sobre la UBA i.
Para integrar el Espacio Público (EP) como puntos esenciales de la accesibilidad, se propuso un factor de ajuste ponderado por la distancia, definido en la Ecuación 8.

$$IAAEVU_i = \frac{IAEVU_i}{1 - \left(\frac{\bar{d}_{i,EP}}{\pi}\right)} \quad \text{Ec. (8)}$$

Dónde: $U \in A(v;r)_i$
$IAAEVU_i$: Índice Ajustado de Accesibilidad del Espacio Vial Urbano en la UBA i.
$\bar{d}_{i,EP}$: Distancia normalizada promedio al EP más cercano en la UBA i.

Análisis geoespacial y geoestadístico de resultados

Para el análisis de los resultados, fue necesario integrar el tejido urbano en teselas geométricas que representen la continuidad espacial del territorio urbano. Ello, se realizó mediante la función Polígonos de Voronoi con base en los centroides de cada tramo vial.

Los patrones geoestadísticos sobre el IAAEVU, se identificaron con el análisis LISA de autocorrelación espacial [22] en GeoDa v. 1.22.0.4 [23]; mediante la I Local de Moran, se detectaron clústers espaciales de acuerdo a la tendencia de valores observados: Alto-Alto [A-A], Bajo-Alto/Alto-Bajo [B-A/A-B], Bajo-Bajo [B-B] y Sin Significancia [SS], definida en la Ecuación 9.

$$I_i = \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} z_i z_j}{\sum_i z_i^2} = z_i \sum_{j=1}^{n} w_{ij} z_j \quad \text{Ec. (9)}$$

Dónde:
I_i: I local de Moran en la UBA i.
w_{ij}: Relación espacial entre las UBA i, j.
z_{ij}: Valores observados en las UBA i, j.

Para la definición del direccionamiento y aglomeración espacial de valores máximos y mínimos [10% mayor y menor del IAAEVU], se utilizó el Elipse de Distribución Direccional (EDE) [24] definido en las Ecuaciones 10.1, 10.2, 10.3 y 10.4.

$$EDE(centro)_{i(x,y)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} \quad \text{Ec. (10.1)}$$

$$EDE(Rotación\ angular)_i(tan\theta) = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2 w_i - \sum_{i=1}^{n} y_i^2 w_i\right) + \left(\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2 w_i - \sum_{i=1}^{n} y_i^2 w_i\right)^2 + 4\left(\sum_{i=1}^{n} x_i y_i w_i\right)}\right)}{2\sum_{i=1}^{n} x_i y_i w_i} \quad \text{Ec. (10.2)}$$

$$EDE(Desv.\ estándar)_{i(\delta x,y)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i cos\theta - y_i sin\theta)^2 w_i}{n \times w_i}}, \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(ycos\theta - x_i sin\theta)^2 w_i}{n \times w_i}} \quad \text{Ec. (10.3)}$$

$$EDE(Excentricidad)_i = \frac{c_i}{a_i} \quad \text{Ec. (10.4)}$$

Dónde:
EDE_i = Elipse de Desviación Estándar i.
x_i, y_i= Coordenadas (Centroide) de la UBA i.
w_i = Peso (variable) asignado a la UBA i.
c_i = Distancia focal del EDE i.
a_i = Distancia eje mayor del EDE i.

Finalmente, se definieron tipologías del territorio urbano, con base en la similitud geoestadística entre indicadores del IAEVU, por medio del proceso de Análisis de Clústers Jerárquicos (HCA), realizado en GeoDa [23].

RESULTADOS

La distribución del IAAEVU se muestra en la Figura 3, registrando patrones heterogéneos en la accesibilidad del área de estudio. Allí, se observa una tendencia a la centralización de los valores máximos, y una difusión irregular y periférica sobre los valores mínimos.

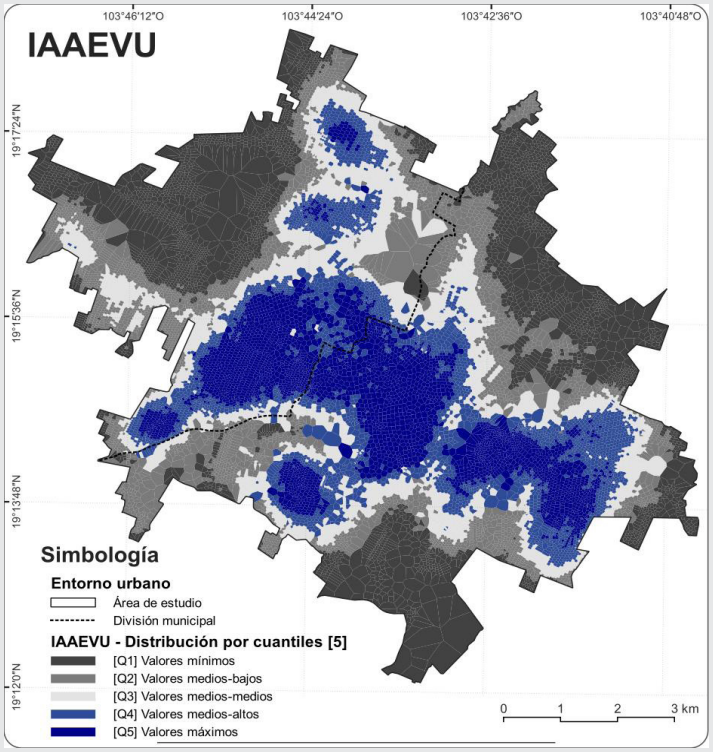


Figura 3: Distribución geoestadística del IAAEVU.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 y la Figura 4 muestran la síntesis estadística de los indicadores de la IAEVU, en donde se registra un rango compacto [0.1-0.4] considerando las 57 UBA aisladas el Espacio Público (parques, jardines, etc.), anómalas en la distribución estadística [<0.10 IAAEVU].

Tabla 3. Variables del índice de accesibilidad vial.

Indicador		Valores observados		
		Prom.	Min.	Max.
S1	Den. poblacional (hab)	6025.72	0	15692
S2	Densidad comercial (UE)	328.01	0	1787
S3	Proximidad institucional (#)	7.04	0	34
A1	Calidad térmica (°C)	41.18	37.89	46.89
A2	Densidad arbórea (NDVI)	0.13	0.08	0.23
A3	Pendiente (m)	44.76	17.25	75.21
M1	Centralidad	376.4	10	519.68
M2	Intermediación	986.25	0.07	8362.44
M3	Conectividad	4.77	0	10
EPD	Distancia al EP (m)	211.34	99.87	1564.74
IA	IAEVU (IA)	0.26	0.1	0.4
IAA	IAAEVU (IAA)	0.27	0.11	0.41

Fuente: Elaboración propia.

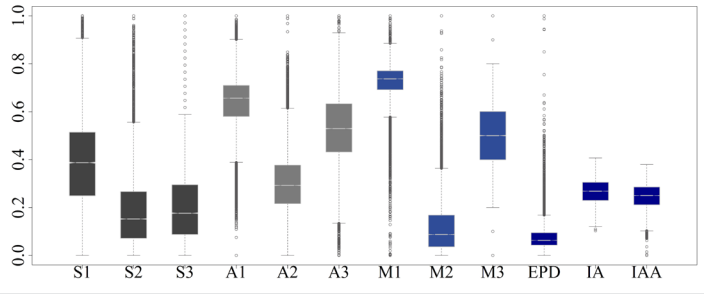


Figura 4: Distribución normalizada de indicadores.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5 muestra los resultados del análisis de Autocorrelación Espacial (LISA), derivados del cálculo del IAAEVU, en donde los clústers indican la presencia de núcleos consolidados del territorio urbano. Los EDE [Elipses de Distribución Direccional] sobre los valores máximos y mínimos [<10%, >90%], indican la centralización del IAAEVU, con una asimetría en su tendencia espacial.

La Tabla 4 muestra las coberturas por clúster, donde el 21.97% de la superficie y el 37.64% de los pobladores en el área de estudio se localizan en el clúster Alto-Alto, y, por el contrario, el 35.76% de la superficie y el 14.51% de la población está vulnerada por bajos índices del IAAEVU [Clúster Bajo-Bajo]. El 47.22% de superficie y el 47.83% de los pobladores están dispuestos dentro de zonas transicionales sin significancia estadística [SSE, p>0.05], definiendo una desvinculación espacial entre los núcleos de accesibilidad.

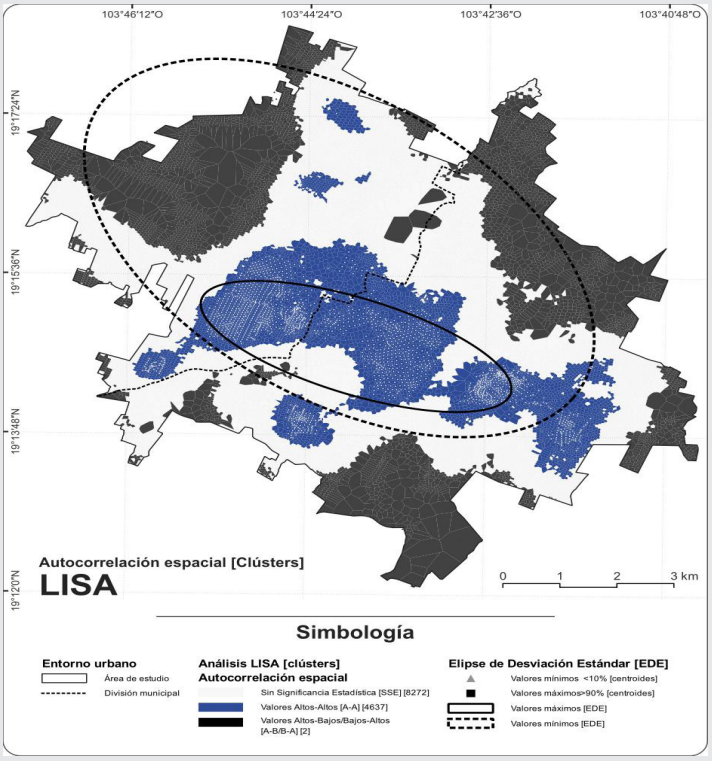


Figura 5: Análisis LISA basada en el IAAEVU.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Síntesis estadística; clústers LISA.

Clúster		Cobertura		IAAEVU
Tipo	Pol.	Área (ha)	Población (hab.)	
Alto-Alto	4637	1541.51	100036	0.31
Bajo-Bajo	3870	2508.15	38576	0.17
Alto-Bajo	1	0.06	33	0.23
Bajo-Alto	1	2.57	4	0.26
SSE	8272	2961.18	127121	0.25

Fuente: Elaboración propia.
Nota: SSE: Sin Significancia Estadística.

Las tipologías urbanas asociadas al IAAEVU, derivaron del Análisis de Clústers Jerárquicos (HCA). Su calibración y ajuste se definió con 6 clústers basados en la similitud geoestadística sobre los indicadores del IAEVU Figura 6.

En ellos, destaca la identificación de un núcleo o «centralidad» en el clúster 1, definido en torno al Zona Centro Histórico del Municipio de Colima, con 39.93 hab/ha y el IAAEVU promedio más alto [0.31]. El clúster 4 define al núcleo urbano consolidado, con el mayor índice de cobertura territorial [29.65%] y poblacional [41.45%], dispuesto en torno al clúster 1 bajo un patrón espacial semi-radial. El clúster 5 define las áreas con el IAAEVU más bajo, teniendo 17.47 hab/ha Tabla 5.

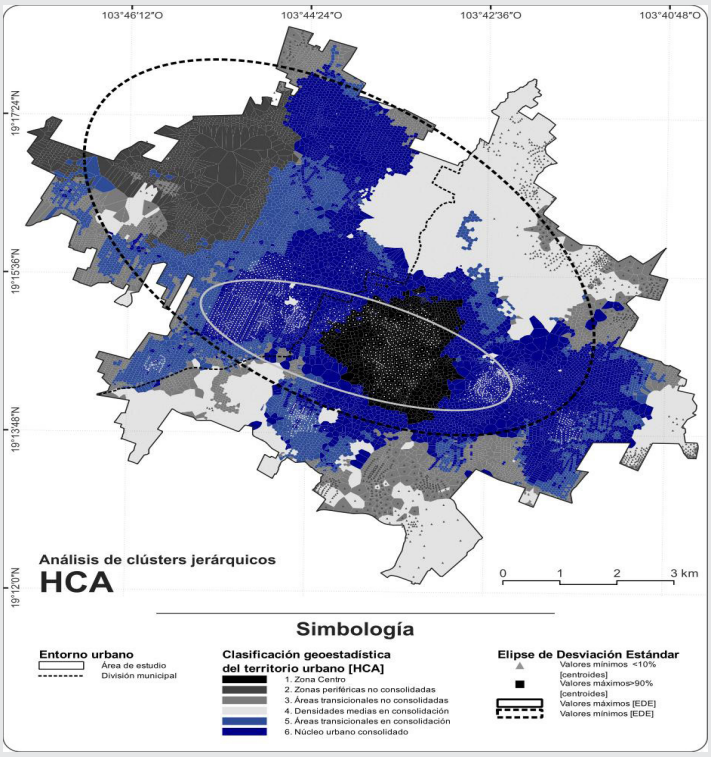


Figura 6: Tipologías urbanas basadas en el IAAEVU.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Síntesis estadística; clústers (HCA).

Clúster		Cobertura		IAAEVU
(#)	Polígonos	Área (ha)	Población (hab.)	
1	1030	452.91	18088	0.31
2	2475	1025.35	32742	0.2
3	2643	1743.87	28562	0.2
4	5940	2079.75	110166	0.28
5	1170	679.68	11875	0.16
6	3523	1031.91	64337	0.26

Fuente: Elaboración propia.

La identificación de correlaciones específicas entre indicadores del IAAEVU, se realizó una matriz de correlación [Pearson], Figura 7.

Entre el conjunto de variables destaca la complementariedad de la densidad comercial y proximidad institucional [S2:S3], con Coeficientes de Correlación [CC] de 0.85, y una significancia p<0.005. Sobre la pertinencia de las variables morfológicas, es significante la relacione entre la centralidad e intermediación como predictores del nivel de articulación socio-ambiental, oscilando entre CC positivos de 0.17-0.38, p<0.005, donde se destaca su efectividad para detectar núcleos de interacción en torno al espacio público, al tener un CC negativo respecto a la distancia promedio sobre cada UGB. [EPD; CC: -0.30].

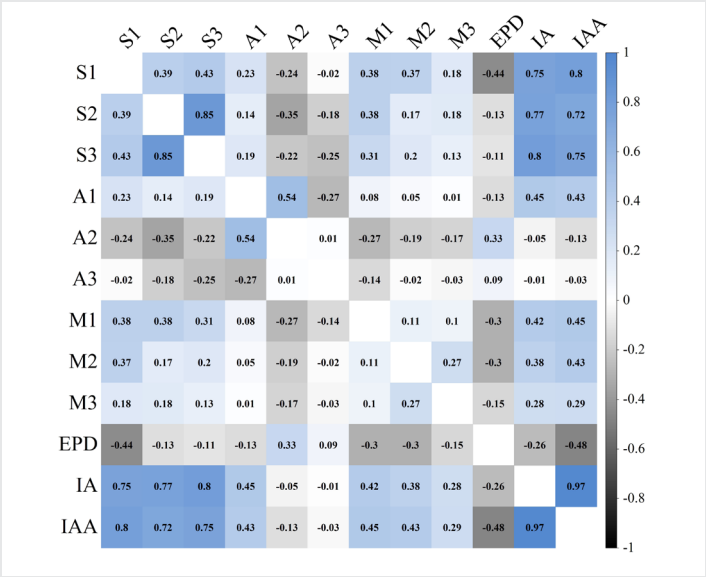


Figura 7: Matriz de correlación factorial (Pearson).
Fuente: Elaboración propia.

El factor de ajuste geoestadístico para el cálculo de la IAAEVU, representa el grado de vinculación ente el tejido vial urbano y los Espacios Públicos del área de estudio, que registra una correlación negativa [CC: -0.48, p<0.005] respecto al índice. En la Figura 8 se muestra un mapeo de densidad 2d, donde los umbrales de distanciamiento [<200; 200-400; >400 metros], demuestran la mayor influencia del Espacio Público sobre la IAAEVU dentro del rango de 0-200 metros. Lo anterior influye sobre las 4585 UGB que sobrepasan el tercer cuartil del IAAEVU [3Q: 0.282], con una EPD promedio de 185.18 metros, y una cobertura territorial de 1534.94ha (21.88% del área de estudio), indicativo de la efectividad del factor propuesto para definir núcleos de interacción.

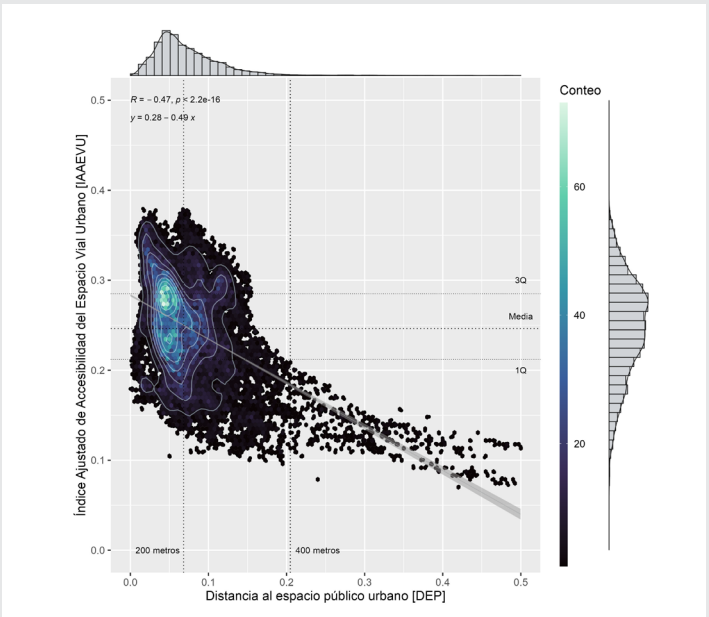


Figura 8: Mapeo de densidad 2d; influencia del EP.
Fuente: Elaboración propia.

La aplicación de la metodología desarrollada indica que el 37.64% de la población reside en núcleos con altos índices de accesibilidad. Al contrastar los resultados con estudios previos [5, 8], donde los sectores consolidados oscilan e entre el 70-90%, la ZCCVA destaca debido a las deficiencias sistémicas en la integración de su territorio. La clasificación por clústers de las seis tipologías urbanas es indicativa de los procesos de fragmentación en la producción del suelo urbano, cuyos patrones permiten la identificación de áreas aisladas o marginadas, representativas de la desigualdad espacial.

En ese sentido, el IAAEVU permite establecer deficiencias sistémicas en el desarrollo urbano que estén asociadas al aislamiento funcional de zonas transicionales, periféricas y de baja densificación, que disminuyan la interacción e integración socioespacial del territorio [4,14].

La incorporación ponderada de indicadores de carácter socioambiental, ambiental y espacial para el cálculo del IAAEVU [3, 5, 9, 11-12] es contribuye al entendimiento de la accesibilidad como un fenómeno espacial con el cual puede segmentarse el territorio urbano de acuerdo a su funcionalidad estructural [14, 25, 26].

Coincidiendo con la literatura, la densidad de población es el mayor predictor geoestadístico de la accesibilidad [4, 6, 8]. La centralidad y la intermediación son asimismo significantes [3, 11, 12], vinculadas con la disponibilidad de los espacios públicos urbanos [4, 7, 14].

Futuras investigaciones pueden comparar el desempeño de ciudades de diversas escalas y localizaciones, para identificar patrones de la accesibilidad, y sus grados de integración.

CONCLUSIONES

La accesibilidad en las ciudades es un indicador significante para definir el nivel local vitalidad, salubridad e integración del territorio urbano; en ese contexto, los resultados de la presente investigación hacen contribuciones sobre el conocimiento de factores que inciden en la accesibilidad, proponiendo criterios de procesamiento geoestadístico para integrar y ponderar el subsistema de espacios públicos con la red vial urbana. En ese sentido, existe un potencial extenso para su aplicabilidad, en donde ha sido demostrada su eficacia para la definición de jerarquías, tipologías y patrones espaciales relativos a la accesibilidad urbana.

El enfoque metodológico abona al estudio de la eficiencia territorial-urbana, que posibilita la identificación de núcleos consolidados dentro de la ciudad, así como de áreas vulneradas; asimismo, se proveen parámetros rescatables para la planificación de ciudades compactas, integradas y sostenibles frente a los desafíos latentes que exigen la eficiencia de recursos y una mejor generalizadas en la calidad de vida de una ascendente población urbana global.

BIBLIOGRAFÍA

[1] ONU-Hábitat, "Nueva Agenda Urbana Ilustrada," 2020. https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/10/nueva-agenda-urbana-ilustrada.pdf (consultado Sep. 04, 2025).

[2] SEDATU (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano) and CONAPO (Consejo Nacional de Población), "Sistema Urbano Nacional 2020-2," 2024. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/951560/SUN_2020_Parte2.pdf (consultado Sep. 04, 2025).

[3] C. Yu, X. Wang, Z. Zheng, and S. Lau, "How Do Urban Environments Impact Walkability? An Analysis Using Multi-Source Data of Beijing," Land, vol. 13, no. 12, p. 2101, Dec. 2024, doi: https://doi.org/10.3390/land13122101.

[4] W. G. Hansen, "How Accessibility Shapes Land Use," Journal of the American Institute of Planners, vol. 25, no. 2, pp. 73–76, May 1959, doi: https://doi.org/10.1080/01944365908978307.

[5] Alexandros Sdoukopoulos, E. Papadopoulos, E. Verani, and I. Politis, "Putting theory into practice: A novel methodological framework for assessing cities' compliance with the 15-min city concept," Journal of Transport Geography, vol. 114, no. 1, pp. 103771–103771, Jan. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103771.

[6] F. Fonseca et al., "Built environment attributes and their influence on walkability," International Journal of Sustainable Transportation, vol. 16, no. 7, pp. 1–40, Apr. 2021, doi: https://doi.org/10.1080/15568318.2021.1914793.

[7] Khaled Alawadi, R. Anabtawi, and Ghalya Alshehhi, "The Minute City: between theory and practicality in suburban landscapes," Sustainability Science Practice and Policy, vol. 21, no. 1, Feb. 2025, doi: https://doi.org/10.1080/15487733.2024.2444007.

[8] J. Wang, M.-P. Kwan, Gezhi Xiu, and F. Deng, "A robust method for evaluating the potentials of 15-minute cities: Implications for sustainable urban futures," Geography and sustainability, vol. 5, no. 4, Aug. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.geosus.2024.07.004.

[9] S. Jin and E. J. Kim, "Correlation of the Walk Score and Environmental Perceptions with Perceived Neighborhood Walkability: The Quantile Regression Model Approach," Sustainability, vol. 16, no. 16, p. 7074, Aug. 2024, doi: https://doi.org/10.3390/su16167074.

[10] L. Mitropoulos, C. Karolemeas, S. Tsigdinos, A. Vassi, and E. Bakogiannis, "A composite index for assessing accessibility in urban areas: A case study in Central Athens, Greece," Journal of Transport Geography, vol. 108, p. 103566, Apr. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103566.

[11] P. Schön, E. Heinen, and B. Manum, "Associations of Street Network and Urban Form with Walking Frequencies," European Journal of Transport and Infrastructure Research, vol. 25, no. 1, pp. 107–132, Jan. 2025, doi: https://doi.org/10.59490/ejtir.2025.25.1.7234.

[12] P. Schön, E. Heinen, Vegar Rangul, E. R. Sund, and Bendik Manum, "The impact of street network connectivity on active school travel: Norway's HUNT study," Environment and Planning B Urban Analytics and City Science, vol. 51, no. 9, Mar. 2024, doi: https://doi.org/10.1177/23998083241235978.

[13] D. M. Pearce, R. Matsunaka, and T. Oba, "Comparing accessibility and connectivity metrics derived from dedicated pedestrian networks and street networks in the context of Asian cities," Asian Transport Studies, vol. 7, p. 100036, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2021.100036.

[14] I. Farías-Moreno, P. Chung-Alonso, A. Cuevas-Muñiz, M. S. del R. Covarrubias-Ruesga, and J. A. Gutiérrez-Valencia, "Caracterización territorial basada en la calidad del espacio público de la zona conurbada Colima-Villa de Álvarez, México," Investigaciones Geográficas, no. 117, Jul. 2025, doi: https://doi.org/10.14350/rig.61015.

[15] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), "Censo de Población y Vivienda 2020," Datos Abiertos, 2020. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020 (consultado Sep. 04, 2025).

[16] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), "Marco Geoestadístico Nacional [diciembre_2023]," Dec. 2023. https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551067314 (consultado Sep. 04, 2025).

[17] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), "Relieve continental. Modelo digital de elevación," 2019. https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental (consultado Sep. 04, 2025).

[18] USGS (United States Geological Survey), "Landsat 8-9 C2 L2. 20240304," EarthExplorer, Mar. 04, 2024. https://earthexplorer.usgs.gov/download/options/landsat_ot_c2_l2/LC80290472024064LGN00/ (consultado Sep. 04, 2025).

[19] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), "Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. Colima.," Jan. 2024. https://www.inegi.org.mx/contenidos/masiva/denue/denue_06_shp.zip (consultado Sep. 04, 2025).

[20] C. H. V. Cooper and A. J. F. Chiaradia, "sDNA: 3-d spatial network analysis for GIS, CAD, Command Line & Python," SoftwareX, vol. 12, p. 100525, Jul. 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100525.

[21] C. Cooper, "Spatial Design Network Analysis (sDNA) Open version 4.2 Manual," 2021. https://sdna-open.readthedocs.io/_/downloads/en/latest/pdf/ (consultado Sep. 04, 2025).

[22] L. Anselin, "Local Indicators of Spatial Association-LISA," Geographical Analysis, vol. 27, no. 2, pp. 93–115, Sep. 1995, doi: https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x.

[23] L. Anselin, I. Syabri, and Y. Kho, "GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis," Geographical Analysis, vol. 38, no. 1, pp. 5–22, Jan. 2006, doi: https://doi.org/10.1111/j.0016-7363.2005.00671.x.

[24] R. S. Yuill, "The Standard Deviational Ellipse; An Updated Tool for Spatial Description," Geografiska Annaler: Series B, Human Geography, vol. 53, no. 1, pp. 28–39, Apr. 1971, doi: https://doi.org/10.1080/04353684.1971.11879353.

[25] C. Wu, J. Wang, M. Wang, and M.-J. Kraak, "Machine learning-based characterisation of urban morphology with the street pattern," Computers, environment and urban systems, vol. 109, no. 4, pp. 102078–102078, Apr. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2024.102078.

[26] M. Berghauser Pont, G. Stavroulaki, and L. Marcus, "Development of urban types based on network centrality, built density and their impact on pedestrian movement," Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, vol. 46, no. 8, pp. 1549–1564, Sep. 2019, doi: https://doi.org/10.1177/2399808319852632.

Multidisciplinario
e
ingenierías
Ingeniantes

Modelo de Innovación didáctica con impacto social para la Conservación del Patrimonio

Colaboración
Fabiola Colmenero Fonseca https://orcid.org/0000-0003-1901-2725, Universidad Autónoma de Coahuila; Ramiro Rodríguez Pérez https://orcid.org/0009-0009-1879-3970; Juan Francisco Palomino Bernal, https://orcid.org/0000-0002-5561-7943, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán; Daniel Ruíz López https://orcid.org/0009-0009-5804-2493, Javier Cárcel-Carrasco, Universitat Politécnica de València

Fecha de recepción: 05 de noviembre de 2025
Fecha de aceptación: 05 de noviembre de 2025

RESUMEN: Este trabajo presenta un Modelo de Innovación Didáctica con Impacto Social orientado a la conservación del patrimonio cultural a través de estrategias educativas innovadoras. La propuesta se alinea con el ODS 4, promoviendo una educación inclusiva y de calidad que fomente el aprendizaje significativo, la conciencia patrimonial y la participación de las comunidades. El modelo integra tecnologías emergentes, metodologías activas y saberes tradicionales, generando espacios de enseñanza y aprendizaje centrados en el contexto sociocultural de los participantes. Como parte de la metodología, se realizó un estudio de casos en México, Brasil y Colombia, con el fin de contextualizar los hallazgos y adaptar el modelo a diferentes realidades locales. Estos estudios permitieron identificar buenas prácticas en educación patrimonial, así como desafíos comunes relacionados con la implementación de herramientas tecnológicas y la integración de técnicas ancestrales en procesos educativos. Los resultados evidencian mejoras en las competencias digitales, la colaboración intergeneracional y el fortalecimiento del sentido de pertenencia en las comunidades involucradas. El modelo propuesto demuestra ser una alternativa viable y replicable para articular la educación, la tecnología y la cultura como ejes clave para la conservación del patrimonio y la transformación social desde una perspectiva educativa.

PALABRAS CLAVE: Innovación didáctica, educación patrimonial, conservación cultural, desarrollo sostenible.

ABSTRACT: This paper presents a Model of Didactic Innovation with Social Impact aimed at the conservation of cultural heritage through innovative educational strategies. The proposal aligns with SDG 4, promoting inclusive and quality education that fosters meaningful learning, heritage awareness and community participation. The model integrates emerging technologies, active methodologies and traditional knowledge, generating teaching and learning spaces focused on the sociocultural context of the participants. As part of the methodology, a case study was carried out in Mexico, Brazil, and Colombia to contextualize the findings and adapt the model to different local realities. These studies enabled the identification of effective practices in heritage education, as well as common challenges associated with implementing technological tools and integrating ancestral techniques into educational processes. The results demonstrate improvements in digital skills, intergenerational collaboration, and a strengthening of the sense of belonging within the communities involved. The proposed model proves to be a viable and replicable alternative to articulate education, technology, and culture as key axes for heritage conservation and social transformation from an educational perspective.

KEYWORDS: Didactic innovation, heritage education, educational technology, cultural conservation, sustainable development.

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual, los desafíos que enfrenta la conservación del patrimonio cultural requieren nuevas estrategias que no solo consideren el resguardo físico de los bienes, sino también su apropiación social a través de procesos educativos. La transformación digital y el avance de las metodologías didácticas abren nuevas posibilidades para integrar saberes ancestrales con herramientas tecnológicas en entornos de aprendizaje significativos [1], [2]. En este sentido, la educación patrimonial se convierte en un eje estratégico para fortalecer la identidad cultural y promover la participación de las comunidades en la conservación de su legado [3], [4].

Diversos estudios han señalado que los modelos educativos tradicionales tienden a excluir los contextos culturales locales y no logran involucrar a los actores sociales en procesos de preservación activa [5], [6]. De acuerdo con [7], el aprendizaje significativo debe basarse en el contexto del estudiante, reconociendo sus saberes previos y su entorno sociocultural como parte del proceso educativo. En esta línea, [8] destaca que la educación patrimonial debe vincular activamente a las comunidades en los procesos de conservación, integrando estrategias didácticas centradas en la sostenibilidad cultural y el aprendizaje situado.

La hipótesis que orienta esta investigación plantea que la integración de un modelo de innovación didáctica con enfoque social y uso de tecnologías emergentes puede mejorar los procesos de conservación del patrimonio cultural, fortaleciendo la educación patrimonial desde un enfoque inclusivo y participativo.

El objetivo general del presente trabajo es diseñar y validar un modelo de innovación didáctica con impacto social para la conservación del patrimonio, utilizando estudios de caso en México, Brasil y Colombia, que permitan identificar prácticas replicables y adaptables a distintos contextos latinoamericanos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Revisión de la Literatura

La conservación del patrimonio cultural ha evolucionado con el tiempo, especialmente con el aumento de la relevancia de las metodologías educativas, las tecnologías emergentes y los enfoques de sostenibilidad. En la literatura revisada, se destacan dos áreas clave: la educación patrimonial y la integración de tecnologías en los procesos educativos de conservación.

Educación Patrimonial

Diversos autores coinciden en la necesidad de involucrar activamente a las comunidades en la conservación del patrimonio cultural. [4] señala que la educación patrimonial debe ser un proceso continuo de sensibilización y formación que refuerce la identidad cultural de los individuos y comunidades. [8] resalta la importancia de un enfoque participativo que fomente la cooperación intergeneracional y el uso de estrategias didácticas centradas en la sostenibilidad cultural. [3] y [5] subrayan la importancia de situar el aprendizaje en contextos específicos que reconozcan la diversidad cultural y las prácticas tradicionales, que las metodologías tradicionales no han abordado adecuadamente.

La innovación didáctica y las tecnologías emergentes han transformado la educación patrimonial. [1] destaca que las herramientas digitales permiten crear entornos de aprendizaje más accesibles e interactivos, facilitando la conexión de las comunidades con su patrimonio. La integración de tecnologías como la realidad aumentada y las plataformas digitales ha incrementado el interés y la participación de los estudiantes en la conservación cultural. Sin embargo, la [2] señala que las limitaciones en infraestructura y acceso en muchas regiones de América Latina dificultan la integración efectiva de estas tecnologías.

Integración de Tecnologías

La sostenibilidad es clave en los modelos educativos para la conservación del patrimonio. [8] argumenta que la educación patrimonial debe alinearse con los principios de sostenibilidad, no solo ecológicos, sino también culturales, para garantizar la transmisión de saberes a las futuras generaciones. La participación comunitaria es esencial, como lo indica la [2], ya que permite que las comunidades lideren los procesos de conservación, fortaleciendo su identidad cultural y promoviendo un sentido de pertenencia. A pesar de los avances, persisten desafíos como la brecha digital y la falta de acceso a tecnologías en muchas regiones de América Latina. [4], [1] y [7] advierten que la adaptación de los modelos educativos a los contextos locales es fundamental, ya que un enfoque homogéneo puede no ser efectivo. Los estudios de caso en México, Brasil y Colombia han proporcionado lecciones valiosas sobre las mejores prácticas y desafíos comunes al integrar técnicas ancestrales con nuevas tecnologías, destacando que las soluciones deben ser flexibles y adaptativas para cada comunidad [8].

Material y Metodología

La metodología de la investigación se estructuró bajo un enfoque mixto, combinando métodos cualitativos y cuantitativos, con el fin de abordar de manera integral la conservación del patrimonio arquitectónico mediante un modelo de innovación didáctica. Este enfoque permitió comprender los fenómenos sociales, culturales y educativos relacionados con las prácticas tradicionales de con-

servación del patrimonio, al mismo tiempo que se promovió un aprendizaje activo y experiencial en las comunidades involucradas. A través del modelo descrito y mostrado en la Figura 1, se buscó integrar el conocimiento ancestral con las innovaciones pedagógicas actuales, favoreciendo una conservación sostenible que preservara la identidad cultural y respondiera a las necesidades sociales y educativas contemporáneas [9] y [10].

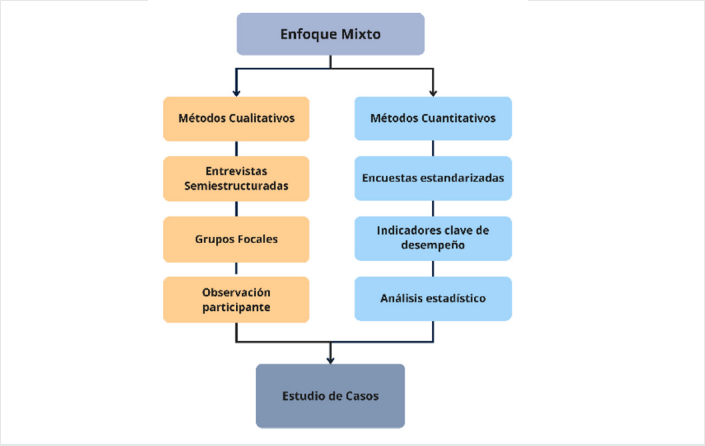


Figura 1 modelo de la metodología desarrollada para el estudio. Fuente: Elaboración propia.

El diseño metodológico adoptó un enfoque mixto, combinando métodos cualitativos y cuantitativos para obtener una visión integral del impacto de la innovación didáctica en la conservación del patrimonio [11].

Métodos Cualitativos

Se emplearon entrevistas semiestructuradas con actores clave (docentes, directivos y expertos en patrimonio) para explorar percepciones sobre el valor educativo del modelo [12]. Además, se llevaron a cabo grupos focales con comunidades locales para identificar oportunidades y desafíos en la implementación del modelo [13]. Se utilizó también observación participativa como herramienta complementaria para comprender a fondo las dinámicas sociales y educativas en su contexto natural [14].

Además, se realizaron grupos focales en un total de nueve comunidades locales, seleccionadas estratégicamente en función de su vinculación directa con iniciativas de conservación patrimonial educativa y su representatividad cultural y geográfica.

Las comunidades seleccionadas fueron:

- México: San Cristóbal de las Casas (Chiapas), Tepoztlán (Morelos), y Valle de Bravo (Estado de México).
- Colombia: Barichara (Santander), Salento (Quindío), y Villa de Leyva (Boyacá).
- Brasil: Paraty (Río de Janeiro), Ouro Preto (Minas Gerais), y Olinda (Pernambuco).

La elección se basó en tres criterios principales:
1. Reconocimiento patrimonial oficial (por ejemplo, declaratorias UNESCO o programas nacionales).
2. Presencia de proyectos educativos comunitarios vinculados a la preservación del patrimonio.
3.Diversidad cultural y geográfica, asegurando representatividad entre regiones urbanas, rurales y costeras.

Estas comunidades fueron seleccionadas con un enfoque de muestreo teórico [15], buscando maximizar la variabilidad en las experiencias locales respecto al modelo educativo analizado. Aunque no se trata de una muestra estadística en sentido cuantitativo, sí constituye una selección cualitativamente significativa para obtener información profunda y diversa.

Además de la aplicación de la observación participativa durante talleres comunitarios y sesiones educativas, lo cual permitió comprender las dinámicas sociales, educativas y culturales que emergieron en la implementación del modelo [14].

Métodos Cuantitativos

Se aplicaron encuestas estandarizadas para medir cambios en el conocimiento y la percepción sobre la conservación del patrimonio antes y después de la implementación del modelo educativo [15]. Asimismo, se incorporaron indicadores clave de desempeño (KPIs) para evaluar la efectividad en la participación, la adquisición de conocimiento y la implementación de prácticas innovadoras [16] 3. Los datos cuantitativos se analizaron estadísticamente para identificar patrones y tendencias [17].

Estas encuestas se aplicaron a un total de 1,050 participantes distribuidos proporcionalmente en los tres países:

- México: 350 personas
- Colombia: 350 personas
- Brasil: 350 personas

Los participantes fueron seleccionados mediante un muestreo estratificado aleatorio, tomando en cuenta tres variables clave:
1. Pertenencia a una comunidad con intervención del modelo.
2. Nivel educativo (educación básica, media, superior).
3. Participación directa o indirecta en actividades educativas patrimoniales.
La muestra total se calculó con base en un margen de error del ±5%, un nivel de confianza del 95%, y una población estimada de 10,000 beneficiarios potenciales en los tres países. Este tamaño de muestra es estadísticamente representativo según los criterios establecidos para estudios sociales a gran escala [18].

Además, se usaron indicadores clave de desempeño (KPIs) para evaluar la efectividad del modelo en tres dimensiones:

- Participación activa en actividades educativas patrimoniales.
- Adquisición de conocimientos relevantes en conservación del patrimonio.
- Aplicación de prácticas innovadoras en el contexto local.

Los KPIs definidos y medidos fueron los siguientes:
1. Nivel de participación
Porcentaje de asistencia a actividades educativas patrimoniales.
Frecuencia de participación en talleres, charlas y eventos relacionados.
Tasa de retención de participantes durante todo el proceso educativo.
2. Adquisición de conocimientos
- Variación en los puntajes obtenidos en pretest y postest sobre contenidos patrimoniales.
- Nivel de comprensión declarada en temas clave (memoria histórica, conservación, identidad cultural).
- Proporción de participantes que reportaron haber aprendido algo nuevo con evidencia cualitativa complementaria.

3. Aplicación de prácticas innovadoras
- Porcentaje de participantes que implementaron nuevas prácticas en su comunidad o institución tras el programa.
- Frecuencia con la que los conocimientos adquiridos se tradujeron en acciones concretas.
- Nivel de apropiación del modelo educativo en contextos locales (evaluado mediante encuestas de seguimiento a los 3 y 6 meses).

Estos KPIs fueron validados por un panel de expertos en educación patrimonial y estadística aplicada, y se midieron utilizando escalas tipo Likert, análisis de frecuencia y pruebas de cambio significativo.

Los datos cuantitativos fueron analizados estadísticamente con el software SPSS v.26, utilizando análisis descriptivos e inferenciales (análisis de varianza, correlaciones y regresiones múltiples) para identificar patrones, tendencias y relaciones significativas entre variables [17].

Estudio de Casos: Se realizaron estudios de caso en comunidades de México, Brasil y Colombia para identificar mejores prácticas y comparar la integración de la innovación didáctica, considerando las particularidades locales [19].

Se realizaron estudios de caso en nueve comunidades locales distribuidas en tres países (México, Colombia y Brasil), con el objetivo de identificar mejores prácticas y comparar la integración de la innovación didáctica en contextos de conservación patrimonial, considerando las particularidades culturales, sociales y educativas de cada región [19].

Las comunidades seleccionadas fueron:
México: San Cristóbal de las Casas (Chiapas), Tepoztlán (Morelos) y Valle de Bravo (Estado de México).
- Colombia: Barichara (Santander), Salento (Quindío) y Villa de Leyva (Boyacá).
- Brasil: Paraty (Río de Janeiro), Ouro Preto (Minas Gerais) y Olinda (Pernambuco).

La elección de estas comunidades se fundamentó en tres criterios principales:
1. Relevancia patrimonial: cada comunidad cuenta con un patrimonio cultural significativo, reconocido a nivel nacional o internacional, incluyendo bienes materiales e inmateriales.
2. Participación en iniciativas educativas: las comunidades han participado en proyectos de educación patrimonial o cuentan con instituciones educativas activas en programas de sensibilización cultural.
3. Diversidad socioterritorial: se buscó representar una variedad de contextos (urbanos, rurales, turísticos, indígenas o afrodescendientes), para enriquecer el análisis comparativo y facilitar la identificación de tipologías replicables.

Aunque la muestra no busca representatividad estadística en términos cuantitativos, su selección estratégica asegura una variedad significativa y relevante para el análisis cualitativo, permitiendo obtener resultados comparables y extrapolables a contextos con características similares en América Latina.

Para la selección de comunidades y participantes en los tres países (México, Colombia y Brasil), se empleó un muestreo por conveniencia, una técnica no probabilística que permite seleccionar unidades muestrales accesibles y pertinentes de acuerdo con los objetivos de la investigación [20].

Este tipo de muestreo fue adecuado dadas las condiciones logísticas y la necesidad de establecer colaboraciones con actores locales vinculados a proyectos de conservación patrimonial y educación innovadora.

Representatividad de la Muestra
Aunque el muestreo por conveniencia no es aleatorio, se tomaron medidas específicas para asegurar que la muestra fuera lo más representativa posible dentro del marco cualitativo y de estudio de caso del proyecto. Estas medidas incluyeron:

1. Diversidad territorial y cultural: Se seleccionaron comunidades con distintos perfiles geográficos (urbano, rural, turístico y tradicional) y con distintas expresiones patrimoniales (indígenas, coloniales,

mixtas), cubriendo tres regiones clave en América Latina.
2. Relevancia institucional y comunitaria: Todas las comunidades seleccionadas tenían experiencias previas en iniciativas educativas o de gestión patrimonial, lo que asegura un grado de pertinencia y profundidad en el análisis de prácticas y percepciones locales.
3. Accesibilidad y colaboración local: La selección también se basó en la posibilidad real de acceso y cooperación con autoridades locales, educadores y organizaciones civiles, asegurando la viabilidad ética y logística del trabajo de campo.

Si bien los resultados no son generalizables estadísticamente al total de las poblaciones nacionales de México, Colombia y Brasil, sí permiten obtener un panorama representativo de distintas realidades sociales y culturales relevantes para el análisis cualitativo y comparativo, reforzando la validez ecológica del estudio.

Análisis Crítico: El análisis de la información fue multidisciplinario, considerando las dimensiones educativas, sociales, culturales y técnicas de la conservación [21]. Se exploró cómo las comunidades integraron enfoques pedagógicos innovadores con prácticas tradicionales, utilizando tecnologías como BIM y la IA para mejorar la eficiencia en la preservación [22].

Desarrollo de un Marco Teórico y Práctico: Los resultados se consolidaron en un marco que integró conocimientos ancestrales y prácticas educativas contemporáneas, proporcionando herramientas aplicables a realidades locales y promoviendo la sostenibilidad y conservación [23].

Evaluación y Retroalimentación: Se implementó un sistema de monitoreo y evaluación con tecnologías en tiempo real para ajustar y optimizar las prácticas pedagógicas, mejorando la efectividad del modelo en la conservación del patrimonio.

RESULTADOS

En la investigación, se adoptó un enfoque metodológico mixto que combinó técnicas cualitativas y cuantitativas para abordar la conservación del patrimonio arquitectónico mediante un modelo de innovación didáctica. La Figura 2 muestra cómo se distribuyen los métodos y enfoques clave en el estudio, destacando que los métodos cuantitativos (30%) y el marco teórico y práctico (35%) fueron predominantes, seguidos de las evaluaciones y retroalimentación (40%). El análisis de los datos de estas metodologías se realizó tanto a través de entrevistas y grupos focales cualitativos como mediante encuesas estandarizadas y KPIs cuantitativos.

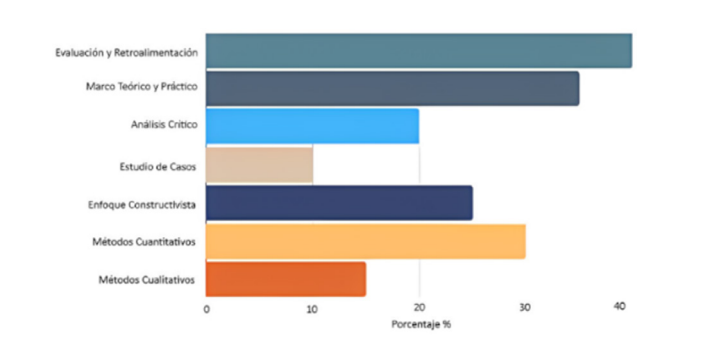


Figura 2 distribución de métodos y enfoques en la investigación.
Fuente: Elaboración propia.

Además, la Figura 3 ilustra la participación de los distintos enfoques en la investigación, destacando la integración del enfoque constructivista (25%) y la implementación de estudios de caso y análisis crítico (20%) como componentes clave en la aplicación de la innovación didáctica en la conservación del patrimonio.

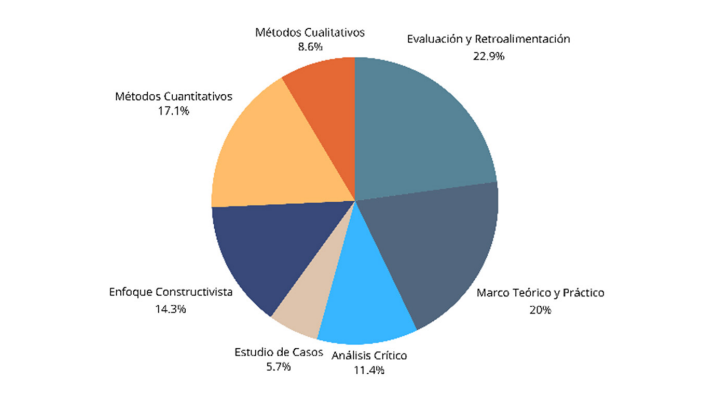


Figura 3 enfoques encontrados en la investigación. Fuente: Elaboración propia.

Las técnicas de construcción tradicionales en América reflejan una profunda conexión con el entorno natural y una valiosa sabiduría empírica. Estas prácticas, al integrarse en proyectos contemporáneos de restauración y construcción sostenible, no solo ayudan a conservar el patrimonio arquitectónico, sino que también promueven la eficiencia energética y la economía circular. En México, por ejemplo, el bajareque, que utiliza materiales locales como caña y barro, es una técnica de bajo costo que destaca por su sostenibilidad [24]. Técnicas como el adobe, el tepetate, y el uso de materiales como la guadua, también son fundamentales en el país debido a sus propiedades térmicas y su resistencia sísmica [25]. en la Figura 4 muestra reúso de materiales para la construcción para otorgar una segunda vida a los mismos.

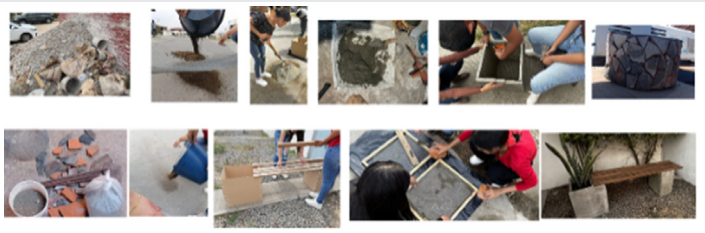


Figura 4 reúso de materiales de la construcción en México. Fuente: Elaboración propia.

En Colombia, el bahareque y la tapia pisada son comunes en el Eje Cafetero, destacando por su flexibilidad y eficiencia térmica [26]. En la Figura 5 se muestran algunos materiales y talleres impartidos y enfocados al reúso y rescate de residuos y técnicas ancestrales de construcción.

Figura 5. materiales y talleres implementados para el reúso de materiales y recuperación de técnicas y procesos constructivos tradicionales en Colombia. Fuente: Elaboración Propia.

En Brasil, el uso del "pau a pique" (entramado de caña y barro) y la "taipa de pilão" (entramado de madera con barro) demuestra la eficiencia de los métodos tradicionales en climas tropicales [27]. Estas técnicas son clave para mejorar la sostenibilidad y reducir el impacto ambiental en la construcción como se muestra en la figura 6 al desarrollar talleres con materiales y sistemas constructivos de la región en Sao Paulo, Brasil.

Figura 6 técnicas y materiales tradicionales desarrollados en Brasil. Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, la integración de materiales reciclados en la restauración patrimonial ha mostrado ser una práctica clave para la sostenibilidad. La reutilización de materiales como ladrillos, madera y concreto no solo reduce el consumo de nuevos recursos y las emisiones de CO_2, sino que también favorece la economía circular [25]. Además, el uso de materiales reciclados en la restauración contribuye a mantener la autenticidad de los edificios históricos. Ejemplos de su aplicación incluyen la reutilización de ladrillos y piedra en la restauración del Centro Histórico de Guanajuato [28] y la aplicación de madera reciclada en Colombia [24]. En Brasil, el Estudio Sarasá ha liderado la integración de materiales reciclados en la restauración de edificios históricos, como en el caso de Ouro Preto, donde se utilizaron tejas cerámicas recicladas, en la figura 7 se muestra el ejemplo de catalogación del proyecto [29].

Figura 7 ejemplo de catalogación del proyecto Ouro Preto en Sao Paulo, Brasil. Fuente: Elaboración propia.

Estos esfuerzos muestran cómo la integración de tecnologías tradicionales y emergentes mejora la eficiencia energética y reduce el impacto ambiental en la construcción y restauración patrimonial.

RESULTADOS

La investigación demostró que un enfoque metodológico mixto, combinando métodos cualitativos y cuantitativos, es efectivo para integrar la innovación pedagógica en la conservación del patrimonio arquitectónico. Los resultados cualitativos, obtenidos a través de entrevistas y grupos focales, indicaron una valoración positiva del modelo por parte de los actores sociales, quienes destacaron la integración del conocimiento ancestral con métodos pedagógicos modernos. En el ámbito cuantitativo, las encuestas y KPIs mostraron una mejora en la percepción y conocimientos sobre conservación del patrimonio, así como un aumento en la participación comunitaria. Además, la reutilización de materiales reciclados en la restauración ha sido clave para la sostenibilidad, reduciendo el impacto ambiental y manteniendo la autenticidad de los edificios históricos. Ejemplos como la restauración del Centro Histórico de Guanajuato y el uso de madera reciclada en Colombia destacan la importancia de integrar estas prácticas en proyectos contemporáneos. Las técnicas tradicionales de construcción, como el bajareque en México, el bahareque en Colombia y el paua pique en Brasil, han demostrado ser fundamentales en la preservación del patri-

monio, contribuyendo a la sostenibilidad y eficiencia energética.

Estudiantes del programa:
Testimonios de Estudiantes y Docentes del Conservación del Patrimonio Cultural del Programa RWYC. (Reconnecting With Your Culture)

A.M.R., estudiante de 8° semestre: "Participar en la restauración de la Casa Guilherme de Almeida fue una experiencia transformadora. Aplicar conocimientos teóricos en un proyecto real me permitió entender la complejidad de la conservación patrimonial y la importancia de la precisión en cada intervención."

L.G.Z., estudiante de 7° semestre: "El uso de tecnologías digitales como el escaneo 3D y BIM en el proyecto de restauración me ayudó a visualizar mejor los procesos y a trabajar con mayor exactitud, complementando lo aprendido en clase."

C.P.G., estudiante de 9° semestre: "La interacción con expertos y la vinculación con instituciones culturales me permitió apreciar el valor social y educativo de la conservación, reforzando mi compromiso profesional."

Docentes del programa:
Dra. FCF, profesora de conservación del patrimonio: "La combinación de herramientas digitales como BIM y el escaneo 3D con métodos tradicionales de restauración ha permitido a los estudiantes desarrollar habilidades esenciales para la gestión del patrimonio. La vinculación con instituciones culturales fortalece el impacto del aprendizaje."

Restauradora profesional y egresada del programa:
F.S. "Gracias a este programa, tuve la oportunidad de trabajar en la restauración del mobiliario de la Casa Mario de Andrade. Aprender sobre materiales originales y técnicas de restauración fue fundamental para mi desarrollo profesional."

CONCLUSIONES

El presente estudio aborda la conservación del patrimonio arquitectónico mediante un modelo de innovación didáctica que integra enfoques pedagógicos tradicionales y contemporáneos para promover un aprendizaje activo, reflexivo y contextualizado en las comunidades locales. Este modelo se ha estado aplicando en talleres prácticos durante los últimos cinco años, lo que ha permitido consolidar una experiencia acumulada y una mejora continua en la formación y conservación patrimonial.

Las transformaciones más relevantes en el proceso didáctico incluyen la formalización de talleres con metodología activa basada en proyectos reales, la incorporación de herramientas digitales avanzadas como BIM y escaneo 3D, y la vinculación directa con comunidades, lo que permite una participación social activa y la contextualización del aprendizaje. Estos aspectos son innovadores porque combinan saberes ancestrales con tecnología y metodologías pedagógicas contemporáneas, favoreciendo un enfoque multidisciplinario, colaborativo y sostenible.

El modelo propone la integración explícita de apartados fundamentales que, aunque mencionados en el texto, no estaban incluidos en el esquema metodológico original: el análisis crítico que permite reflexionar sobre las prácticas y resultados; el marco teórico y práctico que sustenta el diseño didáctico y la aplicación en campo; y la evaluación continua con retroalimentación para ajustar el proceso formativo. Así, se visualiza el proceso completo de aprendizaje y conservación.

En contraposición a lo anterior, se añade en este estudio una descripción del análisis estadístico empleado en el método cuantitativo, que incluye el tratamiento riguroso de datos obtenidos a partir de encuestas y otros instrumentos para validar cuantitativamente el impacto del modelo en la adquisición de conocimientos y prácticas innovadoras.

Para evaluar la efectividad del modelo, se definieron indicadores clave de desempeño (KPIs) que abarcan: la participación comunitaria (número y diversidad de participantes activos), la adquisición de conocimientos (resultados en pruebas y encuestas estandarizadas), la aplicación práctica de innovaciones (proyectos desarrollados y sostenibilidad de los mismos), la satisfacción de los involucrados y el impacto en la sostenibilidad ambiental (uso de materiales reciclados y técnicas constructivas tradicionales).

Finalmente, los resultados confirman que este modelo es replicable y sostenible, capaz de fortalecer la identidad cultural y promover la educación innovadora en conservación patrimonial en otras regiones, destacando la importancia de combinar métodos mixtos, tecnologías emergentes y saberes tradicionales para generar un impacto positivo duradero.

AGRADECIMIENTOS

Convocatoria de Investigación Científica y Humanística en Ejes Estratégicos 2025, Programa Presupuestario F003 (PpF003) "Programas Nacionales Estratégicos de Ciencia, Tecnología y Vinculación con los Sectores Social, Público y Privado" Proyecto PEE-2025-C-6.

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento al equipo del Estúdio Sarasá, Sao Paulo, Brasil, por su invaluable contribución a la conservación y restauración del patrimonio cultural. A la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales y Sede Amazonía, al

Programa ERASMUS Prácticas de la Universitat Politècnica de València, España que nos ha permitido realizar estas prácticas en los tres países a través de la Escuela de Doctorado.

BIBLIOGRAFÍA

[1] C. Cobo, La innovación pendiente. Penguin Random House, 2016. Accessed: Jan. 11, 2025. [Online]. Available: https://www.aprendevirtual.org/centro-documentacion-pdf/La_innovacion_pendiente.pdf.

[2] UNESCO, "Reimaginar Juntos Nuestros Futuros: un nuevo contrato social para la educación," 2021. Accessed: Oct. 20, 2024. [Online]. Available: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379381_spa.

[3] N. G. Canclini, Diferentes, desiguales y desconectados: mapas de la interculturalidad. Gedisa Editorial, 2022. Accessed: Feb. 04, 2025. [Online]. Available: https://oibc.oei.es/uploads/attachments/123/garcia-canclini-nestor-diferentes-desiguales-y-desconectados-mapas-de-la-interculturalidad.pdf.

[4] N. H. Hornberger, "Heritage/Community Language Education: US and Australian Perspectives," Int J Biling Educ Biling, vol. 8, no. 2–3, pp. 101–108, Mar. 2005, doi: 10.1080/13670050508668599.

[5] J. Bruner, La educación, puerta de la cultura. Antonio Machado Libros, 2015. Accessed: Nov. 20, 2024. [Online]. Available: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=yBN5DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT4&dq=La+educación,+puerta+de+la+cultura.+Barcelona:+Paidós.&ots=IxVgFxL63S&sig=dweFtt7MHEbCIKonOvk1tW9KACk#v=onepage&q&f=false.

[6] N. Muñoz Lira and P. Thibaut, "Articulación patrimonio-escuela-comunidad: una aproximación cartográfica desde la teoría ecológica de Bronfenbrenner para el aprendizaje situado rural," Estudios pedagógicos (Valdivia), vol. 48, no. 4, pp. 225–246, 2022, doi: 10.4067/S0718-07052022000400225.

[7] C. M. Moreno and J. A. Barragan, "La práctica pedagógica del docente de enfermería: del conductismo al constructivismo," Praxis & Saber, vol. 11, no. 26, p. e10255, Jun. 2020, doi: 10.19053/22160159.v11.n26.2020.10255.

[8] J. Wuebold, E. Pearlstein, W. Shelley, and G. Wharton, "Preliminary Research into Education for Sustainability in Cultural Heritage Conservation," Studies in Conservation, vol. 67, no. sup1, pp. 326–333, Aug. 2022, doi: 10.1080/00393630.2022.2059642.

[9] K. Charmaz and L. L. Belgrave, "Qualitative interviewing and grounded theory analysis," in The Sage Handbook of Interview Research: The Complexity of the Craft, 2nd ed., J. F. Gubrium, J. A. Holstein, A. B. Marvasti, and K. D. McKinney, Eds. Washington DC: SAGE, 2012, p. 347.

[10] J. W. Creswell and V. L. P. Clark, Designing and conducting mixed methods research. Sage Publications, 2017. Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Designing+and+-conducting+mixed+methods+research.

[11] Y. Li, L. Zhao, J. Huang, and A. Law, "Research frameworks, methodologies, and assessment methods concerning the adaptive reuse of architectural heritage: a review," Built Heritage, vol. 5, no. 1, p. 6, Dec. 2021, doi: 10.1186/s43238-021-00025-x.

[12] A. Belina, "Semi-structured interviewing as a tool for understanding informal civil society," Voluntary Sector Review, vol. 14, no. 2, pp. 331–347, Jul. 2023, doi: 10.1332/204080522X16454629995872.

[13] T. George, "Semi-Structured Interview | Definition, Guide & Examples," Scribbr. Accessed: Feb. 13, 2025. [Online]. Available: https://www.scribbr.com/methodology/semi-structured-interview/.

[14] M. Hammersley and P. Atkinson, Ethnography: Principles in practice. Routledge, 2019. Accessed: Oct. 22, 2024. [Online]. Available: https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781315146027/ethnography-martyn-hammersley-paul-atkinson.

[15] T. Clark, L. Foster, L. Sloan, and A. Bryman, Bryman's Social Research Methods. Oxford University Press, 2021. Accessed: Oct. 23, 2024. [Online]. Available: https://global.oup.com/ukhe/product/brymans-social-research-methods-9780198796053.

[16] B. A. Esparza Ramírez, F. Ricárdez Rueda, and G. A. Torres Ávalos, "Key Performance Indicator (KPI)," in Lean Manufacturing in Latin America, Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 493–512. doi: 10.1007/978-3-031-70984-5_21.

[17] A. Field, Discovering statistics using IBM SPSS statistics. Sage Publications Limited, 2024. Accessed: Nov. 22, 2024. [Online]. Available: https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=83L2EAAAQBAJ.

[18] M. R. West et al., "Trends in Student Social-Emotional Learning: Evidence From the First Large-Scale Panel Student Survey," Educ Eval Policy Anal, vol. 42, no. 2, pp. 279–303, Jun. 2020, doi: 10.3102/0162373720912236.

[19] R. E. White and K. Cooper, "Case Study Research," in Qualitative Research in the Post-Modern Era, Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 233–285. doi: 10.1007/978-3-030-85124-8_7.

[20] I. Etikan, "Comparison of Convenience Sampling and Purposive Sampling," American Journal of Theoretical and Applied Statistics, vol. 5, no. 1, p. 1, 2016, doi: 10.11648/j.ajtas.20160501.11.

[21] E. G. Guba and Y. S. Lincoln, Fourth generation evaluation. Sage, 1989. Accessed: Nov. 13, 2024. [Online]. Available: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=k_zxEUst46UC.

[22] S. Barba, D. Barbato, A. di Filippo, R. Napoletano, and F. Ribera, "BIM-Oriented Modelling and Management of Structured Information for Cultural Heritage," 2020, pp. 630–640. doi: 10.1007/978-3-030-47979-4_54.

[23] R. E. Belford, "Review of Learning Theories: An Educational Perspective," J Chem Educ, vol. 90, no. 2, pp. 150–151, Feb. 2013, doi: 10.1021/ed300874q.

[24] Z. García Valecillo, "Espacios que Construyen Ciudadanía: La Educación Patrimonial en la Gestión del Patrimonio Cultural desde América Latina," Revista América Patrimonio, 2014. Accessed: Nov. 09, 2024. [Online]. Available: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36146959/EP_y_gestion-libre.pdf.

[25] L. E. Garzón Castañeda, "CASA PRIOR: DOS CASOS DE CONSTRUCCION CON TIERRA COMO MATERIAL SOSTENIBLE," Construcción Con Tierra, 2020. Accessed: Sep. 10, 2024. [Online]. Available: https://www.publicacionescientificas.fadu.uba.ar/index.php/construccioncontierra/article/view/971.

[26] C. E. Sánchez Gama, "La arquitectura de tierra en Colombia, procesos y culturas constructivas," Apuntes, 2007. Accessed: Oct. 23, 2024. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/pdf/apun/v20n2/v20n2a06.pdf.

[27] Estúdio Sarasá, "Nosso Olhar nas Casas da Poiesis: Metodologias de Conservación e Formação." Accessed: Jan. 26, 2024. [Online]. Available: https://estudiosarasa.com.br.

[28] G. E. Campos López, "Reseña de los Conceptos: Reciclaje, Restauración y Rehabilitación desde el Punto de Vista Arquitectónico," 13° Simposio de Investigación en Sistemas Constructivos Computacionales y Arquitectónicos SISCCA, 2020. Accessed: May 11, 2023. [Online]. Available: http://fica.ujed.mx/Reciclaje%20%20Arquitectónico.pdf.

[29] Estúdio Sarasá, "Veja nossos trabalhos em Conservação / Restauro," Conservação / Restauro. Accessed: Feb. 02, 2024. [Online]. Available: https://estudiosarasa.com.br/areas-de-atuacao/obras/#.

Gestión *Educativa*

Ingeniantes

Emprendimiento regenerativo y sostenibilidad crítica en la formación universitaria

Colaboración
Juan Francisco Palomino Bernal, https://orcid.org/0000-0002-5561-7943, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, Fabiola Colmenero Fonseca https://orcid.org/0000-0003-1901-2725, Universidad Autónoma de Coahuila; Elsa Ivette Aldana Ornelas, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán; Andrés Salas Montoya, Universidad Nacional de Colombia

Fecha de recepción: 25 de agosto de 2025
Fecha de aceptación: 10 de septiembre de 2025

RESUMEN: La perspectiva crítica y social del emprendimiento desde la sostenibilidad resulta esencial para replantear las prácticas tradicionales de creación de negocios. Este artículo presenta una experiencia pedagógica desarrollada con estudiantes de grado y posgrado en México y España, donde se promovió un enfoque regenerativo y restaurativo mediante metodologías como el diseño estratégico, el pensamiento sistémico y el análisis territorial. Participaron 168 personas seleccionados bajo criterios de diversidad académica y territorial, quienes integraron principios de economía circular, justicia social, ética del cuidado y saberes comunitarios. Los resultados muestran una transformación en la percepción del emprendimiento, transitando de modelos centrados en la rentabilidad enfocado a prácticas regenerativas que vinculan desde territorio, sostenibilidad profunda hasta la justicia socioambiental. Se obtiene evidencia de una necesidad por formar líderes con sensibilidad social y compromiso ambiental con capacidad de co-crear soluciones innovadoras desde una perspectiva transdisciplinaria.

PALABRAS CLAVE: Emprendimiento regenerativo, Sostenibilidad crítica, Justicia socioambiental, Economía circular, Educación superior.

ABSTRACT: A critical and social perspective on entrepreneurship from a sustainability perspective is essential for rethinking traditional business creation practices. This article presents a pedagogical experience developed with undergraduate and graduate students in Mexico and Spain, where a regenerative and restorative approach was promoted through methodologies such as strategic design, systems thinking, and territorial analysis. A total of 168 participants were selected based on academic and territorial diversity, integrating principles of the circular economy, social justice, ethics of care, and community knowledge. The results show a transformation in the perception of entrepreneurship, shifting from models centered on profitability to regenerative practices that connect territorial issues, deep sustainability, and socio-environmental justice. Evidence is obtained of a need to train leaders with social sensitivity and environmental commitment, capable of co-creating innovative solutions from a transdisciplinary perspective.

KEYWORDS: Regenerative entrepreneurship, Critical sustainability, Socio-environmental justice, Circular economy, Higher education.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la creciente crisis ambiental, social y económica ha evidenciado la necesidad de replantear los enfoques tradicionales del emprendimiento desde perspectivas más integrales y comprometidas con la regeneración del entorno. Específicamente en México, fenómenos como la pobreza energética, que afecta a más del 18 % de los hogares en estados como Jalisco, y la migración juvenil hacia entornos urbanos o al extranjero, revelan la urgencia de modelos alternativos que promuevan resiliencia comunitaria y sostenibilidad [1].

Ante el paradigma extractivista y lineal, se propone un emprendimiento con enfoque regenerativo, anclado en el territorio, para articular el conocimiento técnico con los saberes comunitarios y que promueva no solo la justicia social, sino también la ética del cuidado y una sostenibilidad profunda [2] y [3].

La universidad siendo un espacio formativo, tiene un rol clave en este proceso tanto de fomentar la reflexión crítica, el pensamiento sistémico y la acción transformadora. Formar líderes capaces de emprender desde el respeto por la diversidad cultural y la resiliencia eco-social requiere metodologías que integren economía circular, diseño estratégico y justicia ambiental [4] y [5]. Este artículo emerge de un proyecto pedagógico y de investigación colaborativa entre el Tecnológico Nacional de México (TECNM), campus Ciudad Guzmán, y la Universitat Politècnica de València (UPV), desarrollado entre 2022 y 2024 en comunidades del sur de Jalisco, México, en territorios caracterizados por diversidad cultural, presencia de pueblos originarios y problemáticas asociadas a degradación ambiental y rezagos sociales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Revisión de la Literatura

Últimamente se ha cuestionado el modelo económico dominante centrado en la acumulación de capital y el uso intensivo de recursos naturales. Concerniente al emprendimiento sostenible ha emergido como alternativa al buscar conciliar objetivos económicos con valores sociales y ambientales [6]. No obstante, diversos autores advierten que estas iniciativas corren el riesgo de permanecer en lógicas neoliberales si no se incorpora una perspectiva crítica que atienda las estructuras de poder y contexto territorial [7] y [8].

Enfocando esta perspectiva, el emprendimiento regenerativo trasciende la mitigación de impactos al proponer la restauración de ecosistemas, culturas y comunidades, articulando justicia social y equidad intergeneracional [2]. Este panorama reconoce la importancia de los saberes comunitarios y ancestrales, no como recursos complementarios, sino como formas legítimas de conocimiento para diseñar economías alternativas [3].

Concerniente al ámbito educativo, la formación universitaria se presenta como espacio estratégico para integrar metodologías activas, transdisciplinarias y situadas, que promuevan pensamiento crítico, liderazgo ético y cultura del cuidado [5] y [9]. Sin embargo, aún persiste un vacío en la literatura sobre cómo estas aproximaciones pueden consolidar competencias emprendedoras regenerativas en contextos latinoamericanos. En este contexto, el problema de investigación se centra en la ausencia de modelos pedagógicos que integren de manera efectiva diseño regenerativo, pensamiento sistémico y saberes comunitarios en la formación emprendedora universitaria, con el fin de impulsar proyectos que no solo minimicen impactos, sino que regeneren territorios y fortalezcan la justicia socioambiental.

Metodología

Respecto al enfoque adoptado para la investigación desarrollada fue de carácter cualitativo para comprender los contextos sociales, culturales y territoriales en los que se forman los estudiantes en donde participaron 168 estudiantes de Licenciatura y Posgrado, seleccionados mediante criterios de pertenencia territorial, una disposición voluntaria y una diversidad disciplinaria. La propuesta educativa fue desarrollada en colaboración entre el Tecnológico Nacional de México (TECNM), campus Ciudad Guzmán, y la Universitat Politècnica de València (UPV), la misma integró metodologías activas que abarcan desde la observación directa, entrevistas semiestructuradas, estudios de caso y análisis narrativos.

Los datos recolectados fueron procesados mediante análisis temático con codificación abierta y axial, apoyados en software especializado, lo que garantizó la validez de los hallazgos a través de triangulación de fuentes y técnicas [10]. Esta estrategia permitió articular los saberes locales con procesos formativos orientados a la sostenibilidad, reforzando la capacidad de los estudiantes para diseñar proyectos con impacto social, ambiental y cultural. La propuesta pedagógica se fundamenta en enfoques transdisciplinarios que integran metodologías activas de aprendizaje, saberes locales y herramientas tecnológicas para formar líderes capaces de diseñar soluciones sostenibles con impacto social, ambiental, económico y cultural [11].

Emprendimiento Sostenible y Regenerativo

Método: Los estudiantes desarrollan modelos de negocio regenerativos aplicando diseño estratégico, pensamiento sistémico y evaluación de impacto. Se promueven proyectos que integren la ética del cuidado, economía circular, uso consciente del agua y gestión de residuos de construcción y demolición (RCD), articulados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [12] y [13].

Materiales Didácticos:

- Matriz de diseño de cadenas de valor solidarias.
- Casos de estudio de emprendimientos en comunidades indígenas y rurales.
- Guías de evaluación de impacto con SROI, SDG Tracker y Theory of Change.

Actividades clave:

- Diseño de negocios desde el territorio con principios de equidad y justicia ambiental.
- Mapeo de saberes comunitarios para identificar soluciones locales a problemas globales.
- Análisis de ciclo de vida de productos con RCD y materiales locales.

Transición Energética y Justicia Energética
Método: Aplicación de tecnologías como QGIS, Random Forest con encuestas ITER y Simulaciones tanto energéticas como solares en Revit para evaluar desigualdades en el acceso energético y simular escenarios de transición justa [14]. Se construyen mapas de pobreza energética y calidad de vida territorial [1].

Materiales Didácticos:
- Bases de datos del INEGI Y SENER.
- Plataforma QGIS con capas socioambientales.
- Simuladores de producción solar.

Estrategias:
- Promoción de modelos de gobernanza energética comunitaria.
- Co-creación de proyectos de energía solar con enfoque en justicia distributiva.
- Evaluación del impacto de políticas públicas energéticas [15].

Innovación Estratégica para el Desarrollo Sostenible
Método: A través de Design Thinking, los estudiantes co-diseñan soluciones con comunidades utilizando principios de innovación social, regeneración y sabiduría ancestral [16]. Se enfatiza la escalabilidad ética y el cuidado de la vida como criterio central.

Materiales Didácticos:
- Kit de herramientas de innovación (Canvas, Mural, SDG Impact Toolkit).
- Rutas metodológicas para la integración de saberes ancestrales y tecnología.
- Estudios de caso en conflictos socioambientales.

Actividades:
- Desarrollo de proyectos que prioricen la regeneración de ecosistemas.
- Prototipado de soluciones centradas en mujeres, juventudes o pueblos originarios.
- Evaluación de impacto cultural, ambiental y espiritual.

Inteligencia Estratégica para Líderes Globales
Método: Mediante análisis de escenarios y estudios comparativos, los estudiantes evalúan modelos de gobernanza global con énfasis en diplomacia corporativa, ética global, derechos humanos y justicia climática [17]. Se promueve el liderazgo con propósito y visión sistémica [18].

Materiales Didácticos:
- Casos globales de liderazgo transformador (Nueva Zelanda, Costa Rica, Sudáfrica).
- Paneles de análisis de contexto geopolítico (FAO, PNUD, IPCC).
- Herramientas de prospectiva estratégica (STEEP, Árboles de decisiones).

Enfoques prácticos:
- Diseño de propuestas diplomáticas o normativas.
- Estrategias de incidencia política desde lo local.
- Integración de análisis ético, cultural y ambiental en decisiones de alta dirección.

RESULTADOS

El Tecnológico Nacional de México (TECNM) mediante el Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán ha consolidado la metodología cualitativa como una estrategia pedagógica fundamental para comprender y transformar los contextos socio-territoriales en los que se forman los futuros líderes mediante la colaboración con la Universidad Politécnica de Valencia, España, esta propuesta educativa integra saberes locales, enfoques participativos y tecnologías emergentes para diseñar soluciones sostenibles con un impacto significativo en los ámbitos tanto social, ambiental, económico y cultural, a través de herramientas como entrevistas, estudios de caso, análisis narrativos y observación directa, se generan procesos de aprendizaje profundo que no solo fortalecen la conciencia crítica de los estudiantes, sino que también fomentan el emprendimiento regenerativo, la justicia energética y la innovación ética desde una perspectiva transdisciplinaria. En la Figura 1 se visualizan los resultados de manera gráfica, destacando la creación transdisciplinaria, la ética en Liderazgo, empoderamiento energético y la Transformación Emprendedora. Estos resultados resaltan cómo los estudiantes han experimentado transformaciones significativas en su formación, con énfasis en la sostenibilidad, la ética y la justicia social.

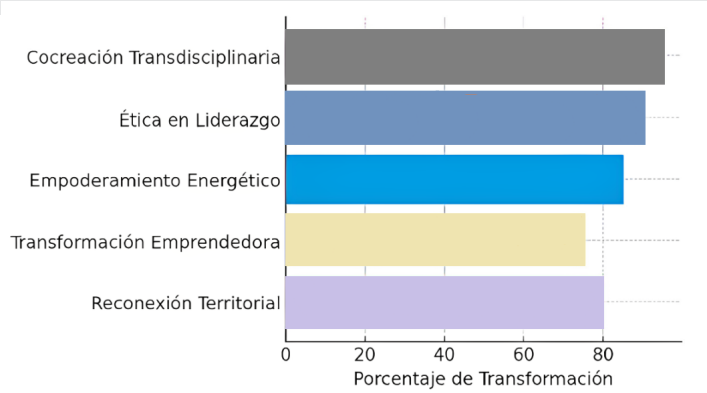


Figura 1: resultados clave obtenidos al implementar la propuesta pedagógica descrita.
Fuente: Elaboración Propia.

Reconexión con el territorio y los saberes comunitarios
Respecto al mapeo participativo y la metodología cualitativa, los estudiantes han expresado un renovado sentido de identidad y pertenencia territorial. En sus relatos, destacan frases como: "Antes no sabíamos que aquí había tanto conocimiento ancestral, ahora vemos el territorio como un aula viva". Este proceso ha favorecido el diseño de soluciones contextualizadas y ha motivado una mayor colaboración con comunidades indígenas y rurales, especialmente en proyectos de economía circular y gestión de residuos de construcción y demolición (RCD), como se muestra en la Figura 2.

Transformación del pensamiento emprendedor

Los análisis narrativos revelaron un cambio profundo en la percepción del emprendimiento: de un modelo clásico centrado en la rentabilidad a uno orientado al impacto regenerativo. Los estudiantes manifestaron que "un negocio ya no tiene sentido si no repara los daños ambientales o sociales que históricamente ignoramos", como se muestra en la sesión de trabajo de la Figura 3.

Figura 2: sesión de trabajo enfocado a saberes comunitarios y la reconexión con el entorno natural en UNAL, Colombia.
Fuente: Elaboración Propia.

Esta transformación se reflejó en la elaboración de modelos de negocio alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), con énfasis en el uso responsable del agua, materiales locales y justicia ambiental.

Figura 3: sesión de trabajo para el análisis narrativo para la percepción en el emprendimiento en el TecNM/I.T.C.G.
Fuente: Elaboración Propia.

Empoderamiento en transición energética

Mediante el uso de herramientas como QGIS, Python y simuladores solares (Revit), los estudiantes construyeron diagnósticos energéticos participativos en comunidades marginadas, estas sesiones fueron desarrolladas de manera virtual como se muestra en la Figura 4.

Varios entrevistados señalaron que "las tecnologías dejaron de ser ajenas, ahora son herramientas para hacer visible la desigualdad energética". Este empoderamiento técnico-social se tradujo en propuestas de micro-proyectos solares con modelos de gobernanza comunitaria, integrando enfoques de justicia distributiva y autonomía energética, para su interpretación grafica mostrada en la Figura 5.

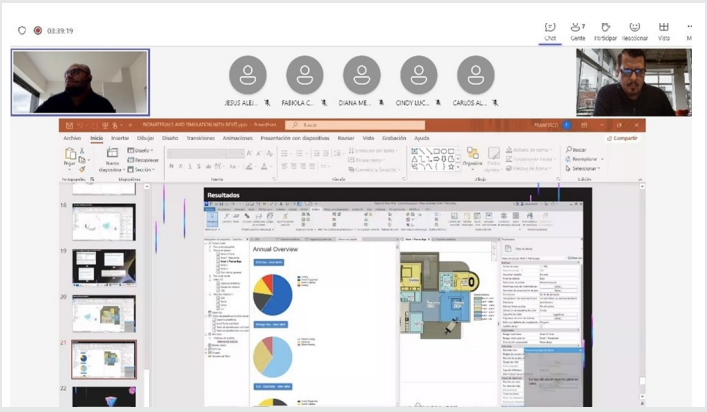


Figura 4: sesión de trabajo virtual para el análisis energético y solar de viviendas en comunidades marginadas en el área de posgrado de la UAG.
Fuente: Elaboración Propia.

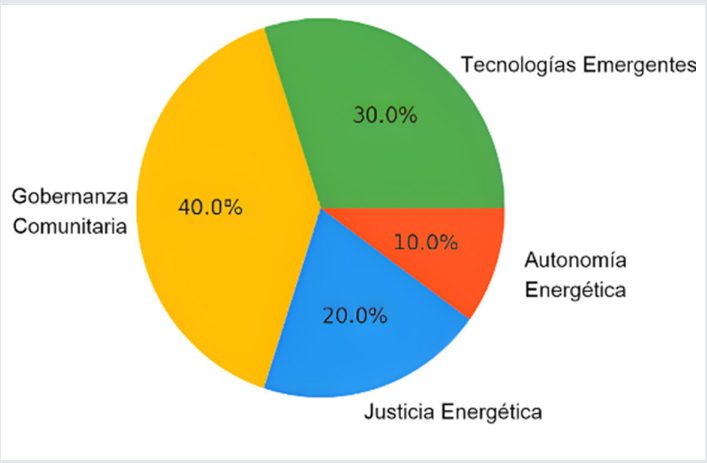


Figura 5: resultados obtenidos del empoderamiento en la transición energética obtenidos.
Fuente: Elaboración Propia.

Sentido ético del liderazgo

Los análisis de escenarios y estudios de caso globales motivaron reflexiones profundas sobre el papel del liderazgo en contextos de crisis climática y desigualdad. Los estudiantes adoptaron una postura crítica frente a las decisiones de alta dirección, afirmando que "ya no se puede liderar sin ética ni sin pensar en los que históricamente han sido excluidos". Esta conciencia derivó en propuestas normativas, estrategias de incidencia y diplomacia local con un enfoque en derechos humanos, equidad de género y sostenibilidad.

Capacidad para co-crear soluciones desde la diversidad

Un hallazgo clave fue la consolidación de habilidades para la co-creación transdisciplinaria. Los relatos estudiantiles evidencian que el aprendizaje colaborativo, el uso de herramientas como Canvas o Mural y la integración de saberes ancestrales les permitió "romper las barreras entre la ciencia, la técnica y la cultura". Esta

apertura se reflejó en proyectos centrados en juventudes, mujeres y pueblos originarios, con prototipos que responden tanto a necesidades locales como a desafíos globales.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados confirman que la metodología cualitativa aplicada generó transformaciones significativas en la percepción y práctica del emprendimiento estudiantil. La reconexión con el territorio y los saberes ancestrales permitió una resignificación del aprendizaje universitario, en línea con lo planteado por [3] respecto al diseño autónomo y situado. Asimismo, el tránsito hacia modelos de negocio regenerativos refleja un cambio conceptual semejante al descrito en la literatura sobre emprendimiento sostenible [6]. Con el propósito de sistematizar los hallazgos de la experiencia formativa, se desarrolló una matriz de síntesis que vincula tanto las metodologías pedagógicas implementadas con las dimensiones de sostenibilidad trabajadas hasta los resultados observados en los proyectos estudiantiles. Esta organización permite identificar de manera clara cómo el uso de herramientas como el diseño estratégico, el mapeo participativo o las simulaciones energéticas no solamente favoreció la adquisición de competencias técnicas, sino que también propició transformaciones en la percepción del emprendimiento y en la relación con el territorio.

La Tabla 1 muestra esta relación, evidenciando la articulación entre enfoques pedagógicos, aprendizajes alcanzados y evidencias empíricas que fortalecen la validez de la propuesta.

Tabla 1. Relación entre metodologías pedagógicas, dimensiones de sostenibilidad y resultados observados.

Metodología aplicada	Dimensión trabajada	Resultados observados	Evidencia narrativa/ documental
Diseño estratégico y pensamiento sistémico	Económica y ambiental	Desarrollo de modelos de negocio regenerativos	Modelos alineados a ODS
Mapeo participativo y saberes comunitarios	Cultural y social	Reconexión con el territorio como “aula viva”	Relatos estudiantiles
Simulaciones energéticas (QGIS, Revit)	Energética y social	Empoderamiento técnico y propuestas de micro proyectos	Diagnósticos energéticos
Estudios de escenarios globales	Ética y liderazgo	Reflexiones críticas sobre gobernanza y justicia social	Propuestas normativas y diplomáticas

Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, el empoderamiento en transición energética se alinea con estudios recientes sobre justicia energética en América Latina, que destacan la importancia de visibilizar desigualdades territoriales y promover gobernanza comunitaria [14]. Del mismo modo, la reflexión crítica sobre liderazgo ético evidencia que la educación superior puede favorecer una cultura de cuidado y responsabilidad global [17].

Se identifican como limitaciones el alcance local del estudio y el tamaño de la muestra, lo cual restringe la generalización de los resultados. No obstante, la replicabilidad metodológica constituye una oportunidad para ampliar el análisis en otros territorios.

CONCLUSIONES

El presente artículo evidenció que la integración de enfoques pedagógicos innovadores y sostenibles en la educación superior promueve el desarrollo de líderes con visión crítica, compromiso ético y capacidad de generar proyectos regenerativos. Entre los hallazgos principales destacan: La Transformación del enfoque emprendedor: pasando de la rentabilidad hacia un paradigma regenerativo con impacto socioambiental, La Reconexión con el territorio: consolidando la identidad cultural y el valor de los saberes ancestrales, El Empoderamiento energético: generado mediante el uso de tecnologías aplicadas a diagnósticos comunitarios, La Ética del liderazgo con énfasis en derechos humanos, equidad y sostenibilidad, La Co-creación transdisciplinaria: la cual articula ciencia, técnica y cultura en soluciones innovadoras. Respecto a las limitaciones: el tamaño de la muestra y la concentración geográfica restringen la generalización.

Futuras líneas de investigación: mediante la expansión de la experiencia a otras regiones de México y América Latina, así como el desarrollo de estudios longitudinales que midan el impacto social y ambiental a mediano y largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Proyectos de Investigación Científica y Humanística en Ejes Estratégicos 2025, Programa Presupuestario F003 (PpF003) “Programas Nacionales Estratégicos de Ciencia, Tecnología y Vinculación con los Sectores Social, Público y Privado” Proyecto PEE-2025-C-6.

Los autores agradecen a las instituciones involucradas y a los participantes por las facilidades otorgadas para el desarrollo del trabajo presentado.

BIBLIOGRAFÍA

[1] P. C. Medina-Pérez, J. D. Quiroz-Jiménez, and H. J. Tapia-Fernández, “Pobreza energética y cambio climático. Aproximación desde el análisis territorial en los municipios de México,” Revista INVI, vol. 38, no. 109, pp. 134–171, nov. 2023, doi: 10.5354/0718-8358.2023.70731.

[2] P. Mang and B. Reed, "Designing from place: a regenerative framework and methodology," Building Research & Information, vol. 40, no. 1, pp. 23–38, Jan. 2012, doi: 10.1080/09613218.2012.621341.

[3] A. Escobar, Autonomía y diseño. Universidad del Cauca, 2019. doi: 10.2307/j.ctvpv50jd.

[4] F. Capra and P. L. Luisi, The Systems View of Life. Cambridge University Press, 2014. doi: 10.1017/CBO9780511895555.

[5] W. Leal Filho, C. Shiel, and A. Paço, "Implementing and operationalising integrative approaches to sustainability in higher education: the role of project-oriented learning," J Clean Prod, vol. 133, pp. 126–135, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.079.

[6] S. Schaltegger and M. Wagner, "Sustainable entrepreneurship and sustainability innovation: categories and interactions," Bus Strategy Environ, vol. 20, no. 4, pp. 222–237, May 2011, doi: 10.1002/bse.682.

[7] P. Dey and C. Steyaert, "The politics of narrating social entrepreneurship," Journal of Enterprising Communities: People and Places in the Global Economy, vol. 4, no. 1, pp. 85–108, Mar. 2010, doi: 10.1108/17506201011029528.

[8] S. A. Zahra, E. Gedajlovic, D. O. Neubaum, and J. M. Shulman, "A typology of social entrepreneurs: Motives, search processes and ethical challenges," J Bus Ventur, vol. 24, no. 5, pp. 519–532, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.jbusvent.2008.04.007.

[9] J. Mezirow, "Transformative Learning: Theory to Practice," New Directions for Adult and Continuing Education, vol. 1997, no. 74, pp. 5–12, Jun. 1997, doi: 10.1002/ace.7401.

[10] J. W. Creswell and C. N. Poth, Qualitative inquiry & research design: choosing among five approaches. SAGE, 2018.

[11] UNESCO, "Educación para el desarrollo sostenible," Sustainable Development. Accessed: nov. 20, 2024. [Online]. Available: https://www.unesco.org/es/sustainable-development/education.

[12] G. Calderón Martínez and J. Pelaez-Higuera, "Educación en emprendimiento y sostenibilidad para la configuración de intenciones emprendedoras sostenibles en estudiantes universitarios," Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales, vol. 26, no. 2, pp. 709–724, May 2024, doi: 10.36390/telos262.15.

[13] E. Horrillo, "Empresariales con alma social," El Pais, Extra Escuelas de Negocios. Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: https://elpais.com/extra/escuelas-de-negocios/2025-04-27/empresariales-con-alma-social.html.

[14] N. A. Mesa Quintero, J. M. Rodríguez Serna, and D. A. Mejía Giraldo, "Análisis del concepto de justicia energética y el contenido curricular de los programas de ingeniería eléctrica," EIEI ACOFI 2024, Ingeniería: Una Transición hacia el Futuro, Sep. 2024, pp. 1–13. doi: 10.26507/paper.4075.

[15] E. Tavera, "Transición energética: un asunto de justicia," ClimateTracker.org. Accessed: oct. 26, 2024. [Online]. Available: https://climatetrackerlatam.org/herramientas/transicion-energetica-un-asunto-de-justicia/.

[16] C. M. Núñez Michuy, L. E. Robalino Laje, D. G. Toledo Dias, and K. C. Saltos Paredes, "Integración de estrategias sobre la sostenibilidad en la Integration of sustainability strategies in Higher Education," JOURNAL OF SCIENCE AND RESEARCH, vol. 9, no. 1, pp. 2528–8083, 2024. doi: 10.5281/zenodo.10615635.

[17] UNESCO, "Liderazgo en la educación," Global Education Monitoring Report. Accessed: Aug. 11, 2025. [Online]. Available: https://www.unesco.org/gem-report/es/publication/leadership

[18] R. A. Rojas Paredes, "La educación superior para el 2050. Desafíos y oportunidades para un futuro no tan lejano," Revista Educación Superior y Sociedad (ESS), vol. 35, no. 1, pp. 152–178, jul. 2023, doi: 10.54674/ess.v35i1.751.

Calidad
y
Sistemas de
Manufactura
Ingeniantes

Impulso a la producción sostenible mediante soluciones energéticas en comunidades artesanales a través de la Ciencia y Tecnología

Colaboración
Fabiola Colmenero Fonseca https://orcid.org/0000-0003-1901-2725, Universidad Autónoma de Coahuila; Juan Francisco Palomino Bernal https://orcid.org/0000-0002-5561-7943, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán; José Manuel Castro Aceves, https://orcid.org/0009-0009-0671-8199; Amparo Borell; Rut Benavente, Universitat Politécnica de Valéncia

Fecha de recepción: 16 de agosto de 2025
Fecha de aceptación: 10 de septiembre de 2025

RESUMEN: Este artículo propone un modelo de electrificación limpia para las comunidades artesanales rurales de la Mixteca de Oaxaca mediante la integración de sinterización en frío y baterías de estado sólido con arcillas y biomateriales de origen local. Una encuesta de campo a 120 artesanos reveló que el 55 % está dispuesto a adoptar soluciones solares para reducir costos y emisiones. La aplicación de cerámica técnica y pigmentos conductores mejora los hornos y las herramientas eléctricas sin alterar los métodos tradicionales, preservando así el patrimonio cultural. Nuestros hallazgos muestran una reducción de hasta un 40 % en el consumo de energía y un aumento del 25 % en la productividad. Concluimos que el artículo destaca la necesidad de políticas públicas que fomenten la adopción de energías renovables mediante incentivos económicos, promoviendo la cohesión social y el desarrollo en las comunidades rurales.

PALABRAS CLAVE: Innovación tecnológica, Energía limpia, Materias primas locales, Artesanía sustentable.

ABSTRACT: This article proposes a clean electrification model for rural artisan communities in the Mixteca region of Oaxaca by integrating cold sintering and solid-state batteries with locally sourced clays and biomaterials. A field survey of 120 artisans revealed that 55% are willing to adopt solar solutions to reduce costs and emissions. The application of technical ceramics and conductive pigments improves kilns and power tools without altering traditional methods, thus preserving cultural heritage. Our findings show up to a 40% reduction in energy consumption and a 25% increase in productivity. We conclude that the article highlights the need for public policies that encourage the adoption of renewable energy through economic incentives, promoting social cohesion and development in rural communities.

KEYWORDS: Technological innovation, Clean energy, Community-science collaboration, Local raw materials, Sustainable craftsmanship.

INTRODUCCIÓN

La producción artesanal en las comunidades rurales de México enfrenta diversos desafíos, principalmente vinculados con la sostenibilidad y la eficiencia energética. Tradicionalmente, estos procesos dependen de métodos manuales y fuentes de energía no renovables, lo que contribuye a la alta demanda de recursos naturales y a la emisión de contaminantes. De acuerdo con el INEGI (2018), más

del 40 % de los artesanos en regiones rurales carece de acceso a energías limpias, lo que limita la productividad y encarece los procesos de manufactura.

En este contexto surge la necesidad de incorporar soluciones tecnológicas que promuevan una producción más sostenible sin alterar las prácticas culturales tradicionales. La ciencia y la tecnología ofrecen un abanico de herramientas capaces de transformar la producción artesanal hacia modelos más eficientes y respetuosos con el medio ambiente [1-3]. Una de las alternativas más prometedoras es la sinterización en frío, un proceso de compactación de materiales cerámicos a bajas temperaturas que reduce de manera significativa el consumo energético en comparación con los métodos convencionales [4 y 5]. Junto con las baterías de estado sólido y los sistemas fotovoltaicos, estas tecnologías pueden optimizar los procesos artesanales, mejorar la calidad de los productos y garantizar eficiencia energética [6 y 7]. Lo anterior permitiría a los artesanos disponer de hornos y herramientas eléctricas más eficientes, conservando a la vez su identidad cultural.

De acuerdo con Martínez-Celorrio [8], La introducción de tecnologías respetuosas con los métodos tradicionales no solo incrementa la sostenibilidad, sino que también fortalece la cohesión social y el desarrollo económico en comunidades rurales. En este sentido, la hipótesis de este trabajo plantea que la integración de soluciones energéticas sostenibles en las comunidades artesanales no solo mejora la eficiencia de la producción, sino que contribuye a la preservación de los saberes ancestrales y a la calidad de vida de los artesanos.

Los objetivos de esta investigación se estructuran en tres dimensiones. En primer lugar, se busca evaluar el impacto de la falta de acceso a energía en comunidades artesanales. En segundo lugar, se plantea mapear las necesidades energéticas de dichas comunidades y determinar cuáles pueden beneficiarse de soluciones sostenibles. Finalmente, se pretende analizar la disposición de los artesanos a adoptar energías renovables y explorar el potencial de la sinterización en frío y las baterías de estado sólido como tecnologías adaptadas al contexto local. Este enfoque permite integrar prácticas tradicionales con innovaciones energéticas, garantizando la preservación cultural y el desarrollo sostenible en el largo plazo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Revisión de la Literatura

La producción artesanal en la Mixteca de Oaxaca enfrenta un desafío crítico: los procesos productivos dependen en gran medida de fuentes de energía costosas e ineficientes, lo que limita la competitividad y genera impactos ambientales negativos. Al mismo tiempo, la migración de jóvenes hacia centros urbanos amenaza la preservación de los saberes ancestrales, pues los talleres artesanales se ven obligados a reducir su escala o cerrar ante la falta de innovación tecnológica. Aunque existen proyectos de electrificación rural en México, pocos han logrado integrar tecnologías avanzadas como la sinterización en frío y las baterías de estado sólido con un enfoque sociocultural. La mayoría de las iniciativas se concentran en proveer infraestructura básica, sin atender las necesidades específicas de los talleres artesanales ni considerar la compatibilidad de estas soluciones con las prácticas culturales tradicionales. Por tanto, el problema de investigación que guía este estudio dicta: ¿cómo puede la incorporación de tecnologías energéticas sostenibles (en particular la sinterización en frío, las baterías de estado sólido y la energía solar) mejorar la eficiencia productiva y la cohesión social de las comunidades artesanales rurales, al tiempo que se preservan los saberes ancestrales y se reducen los impactos ambientales?.

Este problema refleja tanto la dimensión técnica (optimización energética y eficiencia productiva) como la sociocultural (conservación del patrimonio artesanal y cohesión comunitaria), permitiendo plantear un abordaje integral desde la ciencia y la tecnología.

La integración de tecnologías innovadoras en la producción artesanal para promover la sostenibilidad ha sido ampliamente abordada en la literatura. El concepto de producción sostenible es fundamental en este contexto, con [7] y [8] destacando la importancia de un equilibrio entre lo ambiental, lo social y lo económico a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Este enfoque es esencial para la investigación, que busca integrar prácticas sostenibles en la producción artesanal rural.

La integración de tecnologías innovadoras en la producción artesanal también ha sido abordada por [9]Quien destaca la importancia de combinar la ciencia y la tecnología con las prácticas culturales locales para generar soluciones sostenibles. En su estudio, subraya cómo la colaboración entre comunidades rurales y expertos en tecnología permite la adaptación de procesos que respetan los saberes ancestrales, mientras se optimiza la eficiencia y se promueve el uso de energías limpias. Esta visión se alinea con la propuesta de incorporar la sinterización en frío y las baterías de estado sólido en las comunidades artesanales rurales de México, pues ambas tecnologías buscan respetar y enriquecer las prácticas tradicionales, garantizando la sostenibilidad de estas. La autora también enfatiza la relevancia de fortalecer las capacidades locales para superar las barreras económicas y tecnológicas, favoreciendo el desarrollo económico y social de estas comunidades, [9].

En cuanto a tecnologías de materiales, [5] Describen la sinterización en frío como un proceso que optimiza la producción sin requerir altas temperaturas, lo que favorece la eficiencia energética. Esta tecnología es particularmente relevante para las comunidades rurales, ya que reduce el consumo de energía, lo que respalda la idea de incorporar tecnologías limpias en la producción artesanal.

El reconocimiento de los saberes ancestrales como patrimonio vivo es clave en la investigación, ya que [10-12] defienden la integración respetuosa de la tecnología con los

métodos tradicionales, subrayando la necesidad de no perder la identidad cultural al adoptar nuevas prácticas. Este enfoque se alinea con el objetivo de preservar las tradiciones mientras se promueven soluciones tecnológicas.

Finalmente, la electrificación rural es otro aspecto clave. Según la [13]Las energías limpias tienen un gran potencial para mejorar las condiciones de vida y la producción en áreas rurales. Las baterías de estado sólido, mencionadas en la investigación, son una solución viable para facilitar el acceso a energía limpia en estas comunidades; los conceptos descritos son resumidos en la tabla 1 mostrada a continuación.

Tabla 1. Resumen de conceptos relacionados.

Concepto	Autor / Año	Enfoque Teórico	Aportes principales	Relación con la investigación
Producción sostenible	[9], [15]	Desarrollo sostenible	Plantea el equilibrio entre lo ambiental, social y económico; introduce los ODS.	Fundamenta la necesidad de integrar sostenibilidad en la producción artesanal.
Sinterización en frío	[4]	Tecnología de materiales	Describe procesos sin altas temperaturas, con eficiencia energética.	Sustenta el uso de tecnologías limpias aplicables a comunidades rurales artesanales.
Saberes ancestrales	[12], [13]	Enfoque socioecológico	Valora el conocimiento tradicional; critica el desarrollo unidireccional occidental.	Justifica la integración respetuosa de la innovación con prácticas tradicionales.
Electrificación rural	[14]	Desarrollo energético	Señala los beneficios de las energías limpias; identifica barreras de adopción.	Apoya la inclusión de baterías de estado sólido y acceso a energía en comunidades rurales.

Fuente: Elaboración propia.

Metodología

El presente estudio emplea un diseño mixto que integra enfoques cuantitativos y cualitativos para obtener una comprensión integral de los efectos de la electrificación en comunidades rurales de la Mixteca de Oaxaca. Este enfoque permitió la triangulación de datos, aumentando la validez y confiabilidad de los hallazgos [16]. En la figura 1 se muestra de manera gráfica la metodología desarrollada.

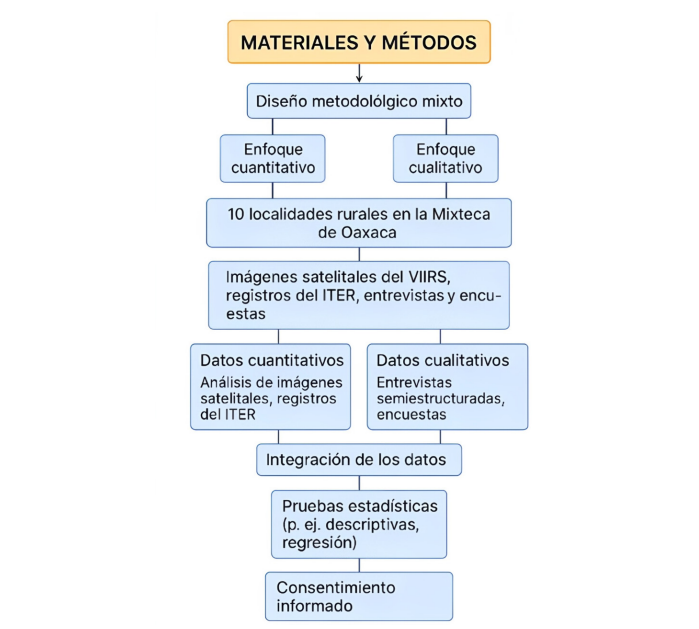


Figura 1. Flujo de la metodología propuesta para el estudio desarrollado.
Fuente: Elaboración propia.

Lugar y procedencia del material.

La investigación se desarrolló en 10 localidades rurales de la Mixteca de Oaxaca (ver Tabla 2), seleccionadas por su diversidad en niveles de electrificación y características socioeconómicas. La selección se realizó mediante un muestreo intencionado, priorizando comunidades con actividad artesanal activa y distintos niveles de acceso a energía. La población de estudio incluyó artesanos y habitantes de estas comunidades. Se aplicaron un total de 120 encuestas validadas, con criterios de inclusión que consideraron: (1) ser mayor de 18 años, (2) participar de manera activa en un taller artesanal, y (3) residir de forma permanente en la comunidad.

Tabla 2: Localidades que se toman en cuenta en el estudio. Fuente: Elaboración Propia

Localidad	Habitantes	Viviendas con electricidad
Amatán Cerro Brujo	110	14.29%
Fortunata	4	0.00%
Ranchería Sahueachi	99	0.00%
Loma Toro	51	0.00%
La Sanguinaria	26	0.00%
Arroyo Carrizo	81	0.00%
San Miguel Chongos	521	0.00%
Loma Cerezal	64	86.67%
Loma de Conejo	60	100.00%
Santa Cruz Yagavila	64	99.44%

Fuente: Elaboración propia.

Los materiales empleados incluyeron imágenes satelitales de radiancia nocturna del sistema VIIRS [17], datos de electrificación y consumo energético del INEGI [18] Así como registros primarios obtenidos mediante encuestas y entrevistas semiestructuradas.

Métodos y Técnicas
Se aplicaron dos métodos principales de recolección de datos:

Diseño Experimental y Procedimiento

1. Datos cuantitativos

• Encuestas: El cuestionario fue sometido a una prueba piloto con 15 participantes para verificar claridad y pertinencia. El instrumento alcanzó un índice de confiabilidad Alfa de Cronbach de 0.86, lo que respalda su consistencia interna.

• Imágenes satelitales: Se procesaron imágenes de radiancia nocturna de la NASA (VIIRS), estableciendo un umbral de 0,3 $nW/cm^2/sr$ para identificar localidades electrificadas. Este umbral se seleccionó con base en estudios previos que lo utilizan como referencia para diferenciar entre zonas con y sin electrificación efectiva [19].

• Registros oficiales: Se analizaron los datos del ITER (INEGI) para medir el impacto en infraestructura, actividad económica y acceso a la educación.

2. Datos cualitativos

• Entrevistas semiestructuradas a 35 artesanos y líderes comunitarios, orientadas a explorar percepciones sobre cohesión social, bienestar, calidad de vida y preservación cultural.

• Codificación y análisis temático: Se utilizó el software ATLAS.ti versión 23 para organizar las transcripciones y generar categorías emergentes, garantizando transparencia y trazabilidad en el análisis cualitativo.

El diseño fue descriptivo-comparativo, considerando tres momentos temporales (2014, 2019 y 2024) para analizar cambios en radiancia lumínica y condiciones socioeconómicas, y el software QGIS para procesar las imágenes satelitales y calcular los niveles de irradiancia lumínica. Además, se procesaron con IBM SPSS Statistics versión 27, aplicando análisis descriptivos, correlación de Pearson, regresiones lineales y ANOVA de un factor, incorporando el cálculo de η^2 y R^2 para medir el tamaño del efecto y la magnitud de las asociaciones.

Los datos cualitativos se analizaron con un enfoque temático, lo que permitió identificar patrones relacionados con cohesión social, percepción de bienestar y adaptación de tecnologías energéticas.

Pruebas Estadísticas

Para el análisis de los datos cuantitativos se emplearon diversas herramientas estadísticas utilizando el software IBM SPSS Statistics versión 27. Se realizaron análisis descriptivos (media, desviación estándar) para caracterizar las variables principales del estudio. Asimismo, se aplicaron pruebas de correlación de Pearson para identificar relaciones lineales entre variables, y modelos de regresión lineal para determinar el grado de asociación entre la electrificación y cambios en las condiciones sociales y económicas de las comunidades.

Además, se utilizó la prueba ANOVA de un factor para comparar diferencias significativas entre los grupos experimentales y el grupo control. Estas pruebas permitieron evaluar el impacto de la electrificación desde un enfoque cuantitativo riguroso.

Ética de la Investigación

Se garantizó la confidencialidad y el anonimato de los participantes, obteniendo consentimiento informado antes de la recolección de datos. Se respetaron los principios de autonomía, transparencia y participación comunitaria en todas las etapas del estudio.

RESULTADOS

El análisis de radiancia nocturna en el estado de Oaxaca, procesado con el software QGIS a partir de datos del sistema VIIRS, permitió elaborar mapas de electrificación correspondientes a los años 2014, 2019 y 2024. Los resultados mostraron que localidades como San Gerónimo Tlacochahuaya experimentaron un aumento significativo de radiancia, mientras que Emiliano Zapata mantuvo valores bajos durante todo el periodo analizado. En términos generales, ocho de las diez comunidades mejoraron su acceso a energía en la última década, aunque se registraron casos de retroceso atribuibles a apagones, migración y problemas locales de infraestructura a partir de lo descrito se desarrolló un mapa para mostrar de manera grafica lo descrito anteriormente como se muestra en la figura 2.

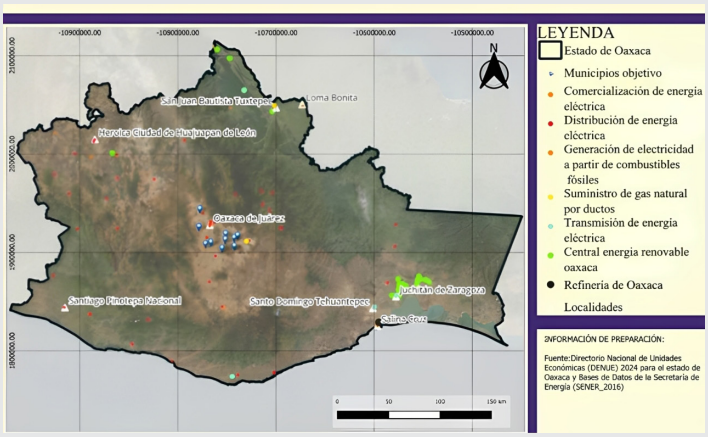


Figura 2. Distribución de la infraestructura eléctrica en el municipio de Oaxaca para el análisis de 10 comunidades.
Fuente: Elaboración Propia.

Adicionalmente, se desarrollaron tres mapas de radiancia lumínica como se muestra en la figura 3 correspondientes a los años 2014, 2019 y 2024. El análisis reveló que la comunidad de San Gerónimo Tlacochahuaya mostró el mayor aumento en radiancia lumínica, mientras que Emiliano Zapata presentó los valores más bajos desde 2015. En general, ocho de las diez localidades han mejorado su electrificación en los últimos 10 años, aunque algunos municipios, como Rancho Valle del Lago, mostraron una disminución reciente. Los descensos en la radiancia podrían estar relacionados con apagones, crisis energética local, migración, desastres naturales o contaminación.

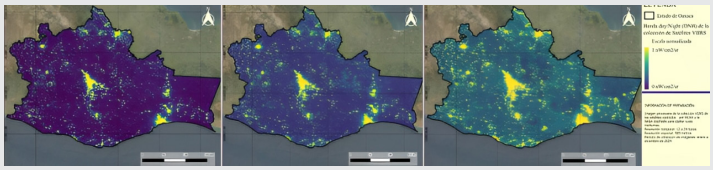


Figura 3. Radiancia lumínica en función del tiempo, año 2014, 2019 y 2024 de izquierda a derecha.
Fuente: Elaboración propia mediante el Software Open-Source, QGIS.

Las comunidades con menor electrificación en la última década fueron Emiliano Zapata, Santa Cecilia Jaliela y San Andrés Ixtlahuaca.

Respecto a la extracción de datos y representación gráfica de los mismos se obtuvo la tendencia de radiancia lumínica en función de cada uno de los 10 municipios considerados de Oaxaca, en la figura 4 se muestra el municipio con mayor índice de aumento de radiancia lumínica en Oaxaca (San Gerónimo Tlacochahuaya).

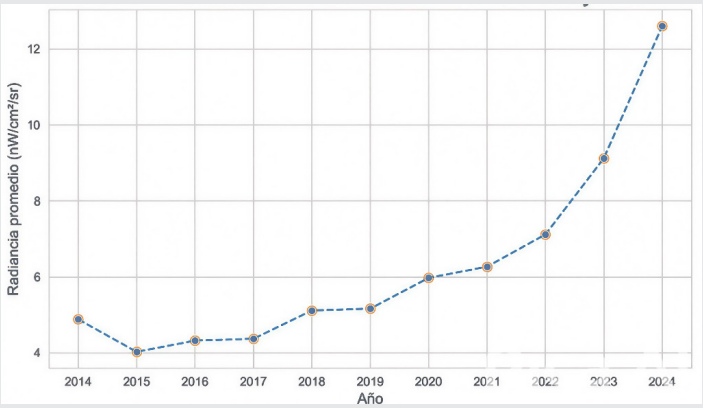


Figura 4. Índice de radiancia lumínica en San Geronimo Tlacochahuaya, en unidades de nW/cm2/sr, con un análisis en el tiempo de 10 años 2014-2024.
Fuente: Elaboración Propia.

Análisis Descriptivo de los Datos.
En cuanto a la caracterización de la muestra, participaron 120 artesanos con una edad promedio de 35,4 años, distribuidos en un rango de 18 a 60 años. El 60 % fueron mujeres y el 40 % hombres (ver figura 5).

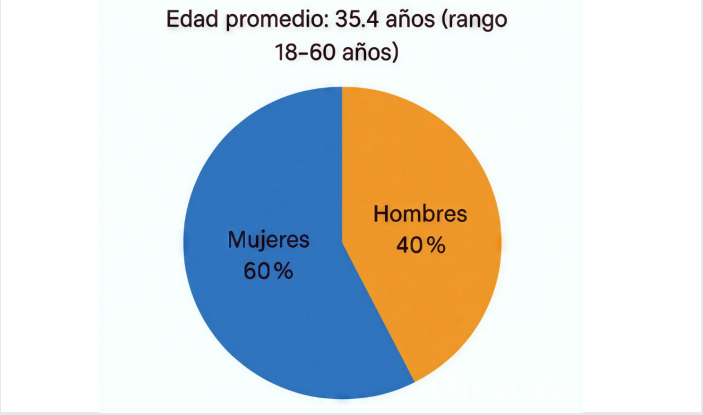


Figura 5. Distribución por género de los articipantes.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos.

Para efectos de análisis, se definió la variable "X" como eficiencia energética, medida a través de la reducción porcentual en el consumo de energía de talleres electrificados, y la variable "Y" como productividad artesanal, evaluada a partir del incremento porcentual en el número de piezas elaboradas por semana. Los resultados descriptivos arrojaron medias de 75.4 para la eficiencia energética y 82.1 para la productividad artesanal, con desviaciones estándar de 6.3 y 4.7 respectivamente, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Resumen de las medias y desviaciones estándar de las variables estudiadas.
Fuente: Elaboración Propia.

Variable	Media	Desviación estándar
Variable X	75.4	6.3
Variable Y	82.1	4.7

Fuente: Elaboración propia.

Análisis Inferencial
Respecto a la prueba ANOVA, un factor indicó diferencias significativas en eficiencia energética entre comunidades electrificadas y no electrificadas ($F = 5.6$, $p = 0.03$), con un tamaño del efecto η^2 de 0.17, lo que corresponde a un efecto medio. Asimismo, los modelos de regresión lineal mostraron una relación positiva entre electrificación y productividad ($\beta = 0.72$, $p < 0.01$), con un R^2 de 0.51. Esto significa que el 51 % de la variabilidad en la productividad se explica por el nivel de electrificación, lo cual subraya la importancia del acceso a energía en los procesos artesanales.

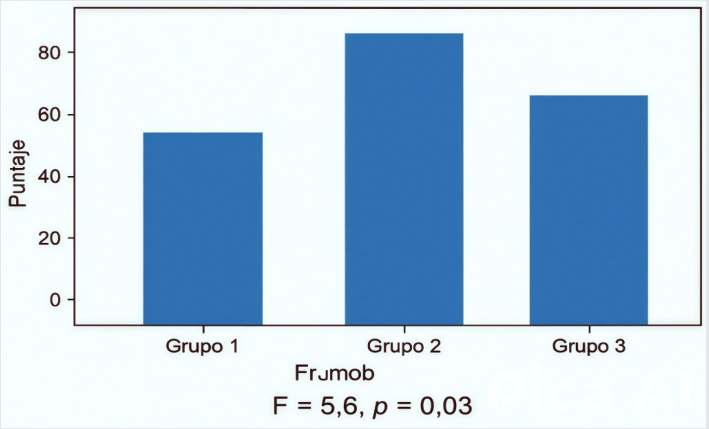


Figura 6. Comparación de los puntajes entre los grupos, que ilustra los resultados de la prueba ANOVA.
Fuente: Elaboración Propia.

Por su parte, los resultados cualitativos obtenidos a partir de entrevistas y encuestas identificaron tres dimensiones clave. En primer lugar, la cohesión social, expresada en testimonios que resaltan cómo la electrificación fomenta el trabajo colectivo y la cooperación en talleres. En segundo lugar, la preservación cultural, pues los artesanos indicaron que la modernización no altera sus métodos tradicionales, sino que los complementa. Finalmente, el bienestar y la calidad de vida, reflejados en la mejora de la iluminación, el acceso a la educación y la reducción de los tiempos de producción. Finalmente, y mediante la triangulación de datos, se confirmó que la electrificación y la integración de tecnologías sostenibles reducen hasta en un 40 % el consumo energético, aumentan en un 25 % la productividad artesanal y fortalecen tanto la cohesión comunitaria como la preservación de los saberes ancestrales.

RESULTADOS

Discusión

Los resultados obtenidos confirman que la electrificación en comunidades rurales de la Mixteca de Oaxaca tiene un

impacto positivo significativo en la eficiencia productiva, la cohesión social y la preservación cultural. Este hallazgo es consistente con estudios previos que destacan la importancia de integrar tecnologías innovadoras en contextos rurales [4], [8], [19]. Ahora, desde el punto de vista técnico, el análisis inferencial mostró que la electrificación se asocia con mejoras en eficiencia energética (η^2 = 0.17) y productividad artesanal (R^2 = 0.51). Estos valores indican que la electrificación no solo genera un efecto estadísticamente significativo, sino que también posee una magnitud práctica importante para las comunidades. Estos resultados respaldan la propuesta de que tecnologías como la sinterización en frío y las baterías de estado sólido pueden optimizar recursos sin comprometer la calidad de los productos finales.

Concerniente a la dimensión sociocultural, el análisis cualitativo reveló que los artesanos perciben la electrificación como un medio para fortalecer la cohesión comunitaria y mantener los métodos tradicionales, lo cual coincide con la perspectiva de Leff y García [13]Quienes subrayan que la innovación debe respetar los saberes ancestrales. Las entrevistas muestran que la introducción de tecnologías no implica una ruptura con las prácticas culturales, sino un complemento que potencia su sostenibilidad. Asimismo, se identificó un interés comunitario real en la adopción de tecnologías solares (55 % de disposición positiva). Este hallazgo resulta estratégico, ya que coincide con la necesidad de diversificar fuentes de energía en comunidades con bajos niveles de radiación, como Emiliano Zapata y Santa Cecilia Jalieza. La combinación de energía solar con materiales locales (arcillas y biomateriales) se presenta como una solución viable para reducir costos y huella ambiental, a la vez que se aprovechan recursos propios de la región. La investigación evidencia que la electrificación contribuye a mejorar la calidad de vida, con efectos en la educación, la salud y la autonomía productiva. Estos hallazgos refuerzan la propuesta de Martínez-Celorrio [8] respecto a que la innovación tecnológica en contextos rurales debe alinearse con el desarrollo social y la preservación cultural.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman que la electrificación en comunidades rurales de la Mixteca de Oaxaca tiene un impacto positivo significativo en la eficiencia productiva, la cohesión social y la preservación cultural. Este hallazgo es consistente con estudios previos que destacan la importancia de integrar tecnologías innovadoras en contextos rurales [4], [8], [19]. Por otro lado, el análisis inferencial mostró que la electrificación se asocia con mejoras en eficiencia energética (η^2 = 0.17) y productividad artesanal (R^2 = 0.51). Estos valores indican que la electrificación no solo genera un efecto estadísticamente significativo, sino que también posee una magnitud práctica importante para las comunidades. Estos resultados respaldan la propuesta de que tecnologías como la sinterización en frío y las baterías de estado sólido pueden optimizar recursos sin comprometer la calidad de los productos finales. Respecto a la dimensión sociocultural, el análisis cualitativo reveló que los artesanos perciben la electrificación como un medio para fortalecer la cohesión comunitaria y mantener los métodos tradicionales, lo cual coincide con la perspectiva de Leff y García [13], quienes subrayan que la innovación debe respetar los saberes ancestrales. Las entrevistas muestran que la introducción de tecnologías no implica una ruptura con las prácticas culturales, sino un complemento que potencia su sostenibilidad.

Además, se identificó un interés comunitario real en la adopción de tecnologías solares (55 % de disposición positiva). Este hallazgo resulta estratégico, ya que coincide con la necesidad de diversificar fuentes de energía en comunidades con bajos niveles de radiación, como Emiliano Zapata y Santa Cecilia Jalieza. La combinación de energía solar con materiales locales (arcillas y biomateriales) se presenta como una solución viable para reducir costos y huella ambiental, a la vez que se aprovechan recursos propios de la región. Importante resulta destacar la investigación que evidencia la contribución de la electrificación para mejorar la calidad de vida, con efectos en la educación, la salud y la autonomía productiva. Estos hallazgos refuerzan la propuesta de Martínez-Celorrio [8] respecto a que la innovación tecnológica en contextos rurales debe alinearse con el desarrollo social y la preservación cultural.

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación fue financiada con fondos de la Convocatoria de Investigación Científica y Humanística en Ejes Estratégicos 2025, Programa Presupuestario F003 (PpF003) “Programas Nacionales Estratégicos de Ciencia, Tecnología y Vinculación con los Sectores Social, Público y Privado” Proyecto PEE-2025-C-6.

Esta publicación forma parte de la subvención CNS2023-144190 financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por el proyecto “European Union NextGenerationEU/PRTR”. Y las subvenciones CIAICO/2023/264 y CIGRIS/2022/077 financiadas por la Generalitat Valenciana.

También a la Universidad Americana de Europa (UNADE) por su apoyo y colaboración en la realización de este estudio. Agradecemos profundamente a los miembros del equipo académico por brindarnos los recursos y las facilidades necesarias para desarrollar este trabajo. Su compromiso con la investigación y el desarrollo académico ha sido fundamental para la consecución de los objetivos de este proyecto. Fomentando un entorno de excelencia académica que ha permitido enriquecer este estudio, proporcionando un espacio para el intercambio de ideas y el avance del conocimiento.

BIBLIOGRAFÍA

[1] C. Álvarez, “From educational innovation to social transformation: Theory and practice,” Intangible Capital, vol. 11, no. 3, Sep. 2015, doi: 10.3926/ic.663.

[2] M. C. Martínez Meneses, M. Tapia Esquivias, and H. Z. del Ángel López, “APLICACIÓN E IM-

PACTO DE LA TECNOLOGÍA ADECUADA EN LA HECHURA ARTESANAL MEXICANA," Pistas Educativas, vol. 2020, no. 136, Celaya, Guanajuato, 2020. Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas

[3] A. Cornelius-Bell and P. A. Bell, "Educational Hegemony: Angloshperic Education Institutions and the Potential of Organic Intellectuals," Canadian Journal of Educational and Social Studies, vol. 4, no. 1, 2024, doi: 10.53103/cjess.v4i1.213.

[4] C. Li, G. Zhu, X. Zhu, and S. Xiong, "Cold Sintering: A New Sintering Technology for Advanced Ceramic Materials," in Advanced Ceramic Materials - Emerging Technologies, Intech Open , 2025, ch. 12. doi: 10.5772/intechopen.1007855.

[5] F. Colmenero Fonseca, A. Borrell, M. Dolores Salvador Moya, R. Benavente, and J. Francisco Palomino Bernal, "Technological Advances in Ceramic Membranes for Water Treatment," 2025. doi: 10.5772/intechopen.1008828.

[6] M. Alberto Nájera, Cultura y Globalización en el Siglo XXI. EDITORIAL UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA, 2009. Accessed: Dec. 27, 2024. [Online]. Available: https://www.libreriacarlosfuentes.mx/es/producto/cultura-y-globalizacion-en-el-siglo-xxi?srsltid=AfmBOopazQmsH12FqxgHOxEXigRpMr1SY6evsKCCUPRQeF4t9-qATezo

[7] J. M. Vaca Rueda and M. E. Sánchez Soriano, "Innovación educativa en la era digital: explorando el impacto de las tecnologías en la enseñanza y el aprendizaje primario," Revista Imaginario Social, vol. 7, no. 2, Apr. 2024, doi: 10.59155/is.v7i2.181.

[8] X. Martínez-Celorrio, "La innovación social: orígenes, tendencias y ambivalencias Social innovation: origins, trends and ambivalences," 2017. Accessed: Jan. 23, 2025. [Online]. Available: http://youngfoundation.org/

[9] G. Sart, "Impact of Higher Education and Globalization on Sustainable Development in the New EU Member States," Sustainability, vol. 14, no. 19, p. 11916, Sep. 2022, doi: 10.3390/su141911916.

[10] Naciones Unidas, "Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible," Departamento de Asuntos Económicos y Sociales Desarrollo Sostenible. Accessed: Aug. 14, 2020. [Online]. Available: https://www.un.org/es/desa

[11] F. Colmenero Fonseca, R. Rodríguez Pérez, J. Perlaza Rodríguez, J. F. Palomino Bernal, and J. Cárcel-Carrasco, "Sustainable Built Environments: Building Information Modeling, Biomaterials, and Regenerative Practices in Mexico," Buildings, vol. 14, no. 1, p. 202, Jan. 2024, doi: 10.3390/buildings14010202.

[12] E. Barrera and G. Gracía, Saberes Tradicionales y Ética Ambiental. Editorial Academia Española , 2011. Accessed: Nov. 20, 2024. [Online]. Available: https://www.iberlibro.com/Saberes-Tradicionales-Ética-Ambiental-Edith-BarreraGastón/30729198140/bd

[13] E. Leff, R. García, P. Gutman, and V. Toledo, Ciencias Sociales y Formación Ambiental . Bracelona, España : Gedisa Editorial, 1994. Accessed: Jun. 18, 2024. [Online]. Available: https://ru.iis.sociales.unam.mx/bitstream/IIS/5067/1/Ciencias_sociales_y_formación_ambiental.pdf

[14] CEPAL, Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe. Naciones Unidas, CEPAL : OLADE : GTZ ; [Publicaciones de las Naciones Unidas, distributor], 2003. Accessed: Sep. 23, 2024. [Online]. Available: https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/6465dbf8-63b2-43cd-87f9-f7f596033fe2/content

[15] United Nations, "The Sustainable Development Goals (DSDG)," Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, Desarrollo Sostenible. Accessed: Aug. 14, 2020. [Online]. Available: https://www.un.org/es/desa

[16] A. Tashakkori and C. Teddlie, SAGE Handbook of Mixed Methods in Social & Behavioral Research. 2455 Teller Road, Thousand Oaks California 91320 United States : SAGE Publications, Inc., 2010. doi: 10.4135/9781506335193.

[17] NOAA, "VIIRS Daily Mosaic," PNG Tiles of Suomi National Polar Partnership satellite flown by NASA and NOAA. Accessed: Feb. 10, 2025. [Online]. Available: https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_ut_mos.html

[18] INEGI, "Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares," Información Demográfica y Social. Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/

[19] L. Del-Río-Carazo, E. Acquila-Natale, S. Iglesias-Pradas, and Á. Hernández-García, "Sustainable Rural Electrification Project Management: An Analysis of Three Case Studies," Energies (Basel), vol. 15, no. 3, p. 1203, Feb. 2022, doi: 10.3390/en15031203.

Multidisciplinario
e
ingenierías
Ingeniantes

Automatización y Detección Temprana de Amenazas Meteorológicas

Colaboración
Omar Álvarez Cárdenas; Gilles Arfeuille; Leonid Alberto Ramos Nando, Universidad de Colima; Fernando Pech May Tecnológico Nacional de México / Campus de los Ríos; Margarita Glenda Mayoral Baldivia, Universidad de Colima

Fecha de recepción: 26 de noviembre de 2024
Fecha de aceptación: 04 de diciembre de 2024

RESUMEN: Se presenta el desarrollo de una Aplicación Web Progresiva (PWA) destinada a fortalecer la capacidad de alerta y respuesta temprana del Centro Operativo de Emergencias (COE) de la Universidad de Colima. La plataforma integra imágenes satelitales geoestacionarias (GOES-18 y GOES-19) y salidas del modelo numérico GFS (Global Forecast System) para generar productos meteorológicos clave como composiciones RGB, análisis sinópticos y trayectorias de masas de aire. Los productos se procesan mediante scripts en Python y se gestionan mediante un backend desarrollado con Django. La interfaz dinámica, desarrollada en React.js, permite a los usuarios del COE visualizar información crítica de forma clara y oportuna. Los resultados iniciales demostrarán la eficiencia del sistema para generar alertas basadas en criterios climatológicos predefinidos, lo cual puede mejorar significativamente la toma de decisiones institucionales ante amenazas meteorológicas.

PALABRAS CLAVE: Alerta temprana, imágenes satelitales, Python, modelación meteorológica, PWA.

ABSTRACT: The development of a progressive web application (PWA) designed to enhance the early warning capabilities of the University of Colima's Emergency Operations Center (COE) is presented. The platform integrates geostationary satellite imagery (GOES-18 and GOES-19) and outputs from the Global Forecast System (GFS) numerical weather model to generate key meteorological products, including RGB compositions, synoptic analysis, and air mass trajectories. These products are processed using Python scripts and managed through a Django-based backend. The dynamic interface, built with React.js, allows COE personnel to visualize critical information in a timely and interpretable manner. Initial results will indicate the system's effectiveness in generating alerts based on climatological thresholds, thereby supporting informed decision-making during meteorological threats.

KEYWORDS: Early warning, satellite imagery, Python, weather modeling, PWA.

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos meteorológicos extremos se han incrementado en los últimos años, tanto en su periodicidad como en su intensidad, generando graves afectaciones en las poblaciones más vulnerables del planeta [1]. Para enfrentar esta situación, se han desarrollado los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) como instrumentos clave para contribuir a la gestión del riesgo en las instituciones de protección civil [2],[3]. Los SAT son considerados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como una herramienta eficaz para contribuir a la reducción de pérdidas humanas, ya que proporcionan información oportuna y confiable para ofrecer una respuesta oportuna ante eventos climáticos adversos.

Los Sistemas de Alerta Temprana se están comenzando a implementar en centros universitarios con alta población estudiantil. Por ello, la Universidad de Colima ha creado un Centro Operativo de Emergencias (COE) con el fin de mejorar sus capacidades de seguimiento y respuesta ante este tipo de eventos hidrometeorológicos que afectan a su comunidad estudiantil. El estado de Colima se encuentra ubicado en una región anualmente afectada por ciclones, lluvias extremas y actividad sísmica persistente [4],[5]. Por tal motivo, es importante que la universidad cuente con un sistema de vigilancia permanente para responder a estos posibles riesgos y activar los protocolos de protección civil, basándose en datos precisos y en tiempo real.

Considerando los beneficios de implementar un SAT por parte del COE en la Universidad de Colima, se propone un sistema automatizado de detección temprana para monitorear amenazas hidrometeorológicas. Su diseño se basa en la obtención y el procesamiento de la información generada por satélites geoestacionarios dedicados al monitoreo ambiental [6],[7],[8]. Los datos satelitales se analizan y transforman en información visual utilizando principalmente el lenguaje de programación Python, la cual es interpretada por el personal del COE para la toma de decisiones cuando la comunidad universitaria pueda verse afectada por eventos climáticos que pongan en riesgo su seguridad [9],[10]. La propuesta del SAT en la Universidad de Colima se convertirá, a corto plazo, en una solución tecnológica eficiente para la gestión de riesgos en una institución que concentra la mayor matrícula de estudiantes del estado (31,476) [11].

Revisión de la literatura

Estudios realizados en años recientes sobre los desastres y los daños que producen, han incrementado la producción de diversas investigaciones centradas en la automatización y la eficiencia de los Sistemas de Alerta Temprana [12],[13],[14]. La vigilancia y el pronóstico de los fenómenos meteorológicos actualmente se basan en el uso de información satelital debido a su cobertura global y a un factor muy importante: la disponibilidad prácticamente en tiempo real con un grado de resolución espacial suficiente para la generación de productos hidrometeorológicos.

La constelación de satélites geoestacionarios es fundamental para proporcionar información sobre el estado del tiempo, éstos satélites forma parte del programa GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) operado por la Oficina Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Los satélites GOES son un pilar tecnológico para la detección de ciclones tropicales, tormentas eléctricas, distintos tipos de nubosidad y cambios de temperatura [6]. Ellos proporcionan datos que permiten generar imágenes multiespectrales con alta frecuencia temporal, prácticamente en tiempo real, para mantenerse al día de la evolución de las amenazas meteorológicas [15].

Debido a la accesibilidad de la información proporcionada por los satélites GOES, se han realizado diversos estudios enfocados en la sistematización de datos para generar imágenes meteorológicas. Uno de ellos es el propuesto en [5], basado en una arquitectura de aprendizaje automático de imágenes meteorológicas generadas para predecir eventos de alta precipitación en zonas vulnerables. Algo similar se propone en [10], que consiste en una plataforma web que integra datos satelitales y genera modelos meteorológicos con la finalidad de producir alertas en tiempo real sobre zonas regionales de interés, mostrando resultados positivos en cuanto a la precisión y la eficiencia de los datos obtenidos.

La generación de herramientas de teledetección ambiental, pronóstico de lluvias y detección de ciclones tropicales debe ser una solución de bajo costo para que las universidades puedan implementar un SAT. Como se indica en [8], el lenguaje de programación Python tiene gran reconocimiento particularmente en el procesamiento de imágenes. Esto ha motivado a la comunidad científica a utilizarlo en la generación de este tipo de herramientas tecnológicas debido a su gran ecosistema de librerías especializadas como son Satpy, Pyresample, Rasterio y Matplotlib entre las más importantes [16].

Pero no solo es considerar las librerías y lenguajes de programación más adecuados para este tipo de herramientas tecnológicas; también se debe tener en cuenta que todo este trabajo está enfocado en un usuario final. Por ello, lo complejo de todos los procesos realizados debe ser transparente a través de una interfaz de visualización que facilite a los miembros del COE la toma de decisiones, mediante una solución que ofrezca usabilidad y claridad en la generación de alertas climáticas. Se muestra esto en [17], donde se resalta la importancia de crear sistemas que integren capacidades técnicas y mecanismos de comunicación eficaces para los responsables de la toma de decisiones, sin complicaciones ni condiciones de incertidumbre derivadas de la complejidad del SAT.

En el contexto institucional de la Universidad de Colima, el uso y la infraestructura de tecnologías satelitales para el monitoreo meteorológico están limitados por consideraciones técnicas y por el presupuesto disponible. Sin embargo, existen posibles soluciones de bajo costo para el desarrollo de estaciones terrenas satelitales utilizando los SDR (Radios Definidos por Software) y computadoras de

propósito general como la Raspberry Pi. Estas soluciones han permitido a universidades y centros de investigación implementar estaciones satelitales alternas capaces de recibir transmisiones en la banda L (1.7 Ghz) de los satélites GOES [18].

Considerando estas soluciones, se refuerza la viabilidad técnica para acceder no solo a los datos de los sitios oficiales de NOAA, sino también a la información de estaciones terrenas propias. Esto constituye un área de oportunidad para implementar una estación terrenal satelital alterna universitaria para la disponibilidad de datos climáticos para un SAT universitario.

MATERIAL Y MÉTODOS

El proyecto de automatización y detección temprana de amenazas meteorológicas es una investigación aplicada, cuyo objetivo principal es desarrollar una aplicación web progresiva orientada a la automatización y a la presentación dinámica de productos meteorológicos, que permita al COE de la Universidad de Colima contar con herramientas de alerta temprana eficaces. Su aplicación es la detección de amenazas meteorológicas a nivel local y regional, más precisas y relevantes para el usuario que las existentes, las cuales se enfocan en regiones más amplias o presentan proyecciones inadecuadas. El enfoque metodológico es de tipo tecnológico y funcional, integrando técnicas de programación, modelado climático y diseño web con base en los requerimientos del usuario final.

Los datos meteorológicos utilizados para alimentar el sistema se obtienen de fuentes confiables y oficiales, principalmente:

- Imágenes satelitales NOAA GOES-R Geostationary Operational Environmental Satellites) en AWS (Amazon Web Services): Proporciona imágenes satelitales multiespectrales de los satélites GOES.
- NOMADS (NOAA Operational Model Archive and Distribution System): Portal de modelos operativos y sistema de distribución que incluye las salidas del Global Forecast System (GFS) utilizadas en el pronóstico numérico.
- Sistemas de visualización del National Weather Service y del GDAS: para verificación.

La Figura 1 muestra un diagrama de despliegue UML que representa la arquitectura tecnológica del sistema propuesto. El servidor de datos externo integra las principales fuentes de información meteorológica, como las imágenes satelitales GOES a través de AWS y los productos del modelo numérico GFS proporcionados por NOMADS. Estos datos son consultados por el backend desarrollado en Django, el cual ejecuta scripts en Python para el procesamiento de imágenes y modelado meteorológico, y almacena los resultados en una base de datos.

La capa de presentación del sistema está compuesta por un frontend desarrollado en React.js que interactúa con el backend mediante una API para mostrar los productos meteorológicos generados. Finalmente, el usuario final (personal del COE) accede a la plataforma a través de una Aplicación Web Progresiva, utilizando un navegador convencional desde computadoras o dispositivos móviles. Las líneas de conexión entre nodos indican los flujos de datos y los protocolos (API, HTTP) necesarios para garantizar la interoperabilidad entre componentes distribuidos.

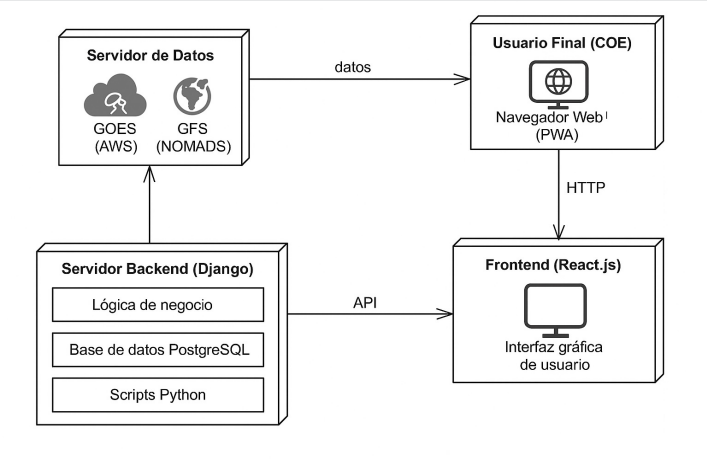


Figura 1: Diagrama de despliegue UML del sistema.
Fuente: Elaboración propia.

Diseño metodológico

El desarrollo e implementación de un SAT se basa fundamentalmente en una solución de software. Para lograr la automatización y la detección temprana de amenazas meteorológicas, es necesario establecer las fases de planificación, análisis, diseño, implementación, pruebas, despliegue y mantenimiento, que conforman la metodología del ciclo de vida del desarrollo de software (SDLC).

Para desarrollar la automatización y la detección temprana de amenazas meteorológicas para el COE de la Universidad de Colima, se adoptó el modelo incremental evolutivo como metodología de ciclo de vida. Este enfoque permite crear la solución de software en fases sucesivas, lo que facilita la validación de cada una por parte de COE antes de continuar con la siguiente. Se inicia con los módulos de descarga y visualización de imágenes; posteriormente, con la integración de modelos numéricos y mecanismos de alerta automatizada, hasta la interfaz ajustada a los requerimientos del usuario final. La elección del modelo incremental evolutivo facilita la incorporación de pruebas y mejoras iterativas en

cada fase, asegurando la adaptabilidad del proyecto ante cambios operativos o tecnológicos.

La finalidad de la metodología es clara: minimizar los riesgos y garantizar la adaptabilidad de la solución de software ante futuras mejoras. Una descripción general de los procesos a implementar es la siguiente:

a) Procesamiento meteorológico en Python:

- Desarrollo de scripts para descargar imágenes satelitales GOES y salidas de GFS.
- Aplicación de técnicas de procesamiento digital de imágenes, interpolación y análisis estadístico.
- Generación de productos como imágenes corregidas, mapas de nubosidad, campos vectoriales de viento, mapas de precipitación acumulada, entre otros.

b) Tipos de análisis meteorológico considerados:
- Escala global: Circulaciones planetarias y ondas de gran escala.
- Escala sinóptica: Ciclones extratropicales y ríos atmosféricos.
- Escala mesoescalar: Sistemas convectivos de mesoescala y tormentas locales.
- Escala convectiva: Evolución de las celdas de tormenta y de la actividad eléctrica.
- Análisis marino: Oleaje, presión superficial y vientos sobre el océano.
- Análisis de la trayectoria del aire: Estimación de las rutas de las masas de aire mediante modelos como HYSPLIT.

c) Diseño del sistema informático:
- Backend en Django (Python): Gestión de usuarios, autenticación, almacenamiento de datos meteorológicos en la base de datos y lógica de negocio.
- Frontend en React.js: Interfaz dinámica y responsiva que permite a los integrantes del COE consultar visualizaciones meteorológicas, imágenes satelitales procesadas, campos vectoriales, animaciones y alertas.

d) Diseño del sistema informático:
- Basado en condiciones específicas identificadas en los productos generados.
- Incorporación de reglas y umbrales climatológicos definidos para la región del occidente de México.
- Visualización mediante un sistema de notificaciones en la PWA y alertas visuales codificadas por colores.

Reproducibilidad
Toda la lógica de programación, las estructuras de base de datos, los esquemas de API y los scripts meteorológicos se documentan en un repositorio controlado con Git (Tabla 1). La solución está diseñada con tecnologías de código abierto, lo que facilita su adopción por otras instituciones interesadas en replicar el sistema con ligeros ajustes regionales, una vez que el COE determine el tipo de protección legal.

Tabla 1. Fuentes de datos y herramientas utilizadas.

Fuente	Descripción	Propósito
NOAA GOES-R	Imágenes satelitales multiespectrales	Vigilancia atmosférica y oceánica
NOMADS	Modelos numéricos GFS	Análisis sinóptico y predicciones
Python + Satpy y Metpy	Procesamiento de imágenes satelitales	Generación de productos visuales
Django	Framework web backend	Interfaz de visualización PWA
React.js	Framework frontend	Interfaz de visualización de la PWA
PosgreSQL	Base de datos relacional	Almacenamiento de productos

Fuente: Elaboración propia.

Validación y pruebas
Se realizan pruebas funcionales y de desempeño, incluyendo:

- Verificación de la precisión de los productos meteorológicos mediante la comparación con plataformas oficiales como NOAA View y el Servicio Meteorológico Nacional.
- Pruebas de carga para garantizar la disponibilidad en condiciones de consulta intensiva.
- Evaluación de la experiencia de usuario mediante pruebas con integrantes del COE, aplicando criterios de usabilidad y de pertinencia de la información presentada. Se aplicará una vez que termine el ciclo actual de tormentas tropicales y huracanes.

RESULTADOS
Durante la fase inicial del desarrollo del sistema se tiene diseñado un entorno funcional que integra las siguientes capacidades:

- Automatización de la descarga y el procesamiento de imágenes satelitales, mediante scripts en Python, desde los servidores de NOAA y Tropical Tidbits.
- Generación de productos meteorológicos derivados, como composiciones RGB, mapas de nubosidad, campos de viento y trayectorias de masas de aire, interpretables por el personal del COE Figura 2.

- Construcción de un backend robusto en Django capaz de almacenar los productos generados, gestionar la autenticación de usuarios e interactuar con la base de datos para realizar consultas eficientes.
- Diseño de una interfaz PWA con React.js, con navegación responsiva y visualización clara de los productos generados, accesible tanto en computadoras como en dispositivos móviles.

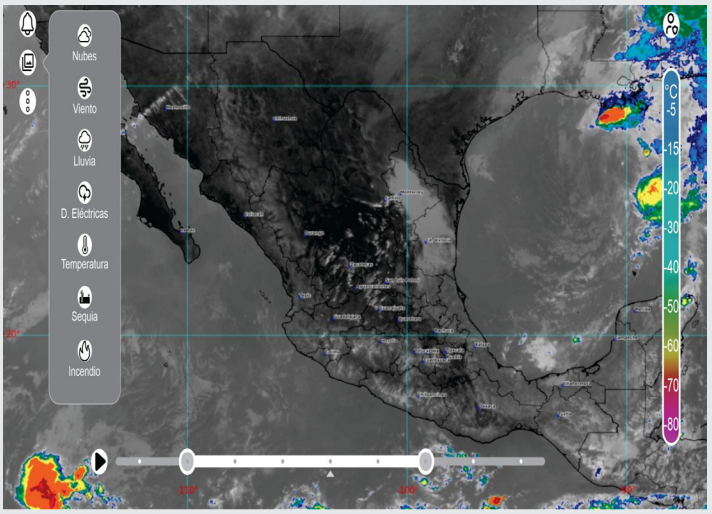


Figura 2: Gestión de productos meteorológicos.
Fuente: Elaboración propia.

Entre los productos a generar por el sistema para su proceso de validación funcional durante la actual temporada de huracanes y tormentas tropicales del 2025, se encuentran los siguientes:

- Mapa de nubosidad IR durante la formación de un sistema convectivo en el Pacífico.
- Trayectoria de las masas de aire sobre la región de Colima, analizada con base en los datos de GFS y visualizada en un mapa dinámico.
- Composición atmosférica RGB, generada con librerías de Python, utilizada para identificar la intrusión de aire seco en las capas de la atmósfera.

La PWA incluye mecanismos de activación de alertas visuales cuando se detectan condiciones de riesgo, como precipitaciones acumuladas cada 24 horas, presión atmosférica descendente continua o vientos fuertes. Estas alertas se visualizan como notificaciones codificadas por colores directamente en el panel de usuario del COE (Figura 3).

CONCLUSIONES

La implementación del sistema propuesto representa un avance significativo en la capacidad institucional de la Universidad de Colima para anticipar y responder a amenazas meteorológicas. La combinación de herramientas de código abierto, el procesamiento satelital en tiempo casi real y la visualización web progresiva ha permitido construir una

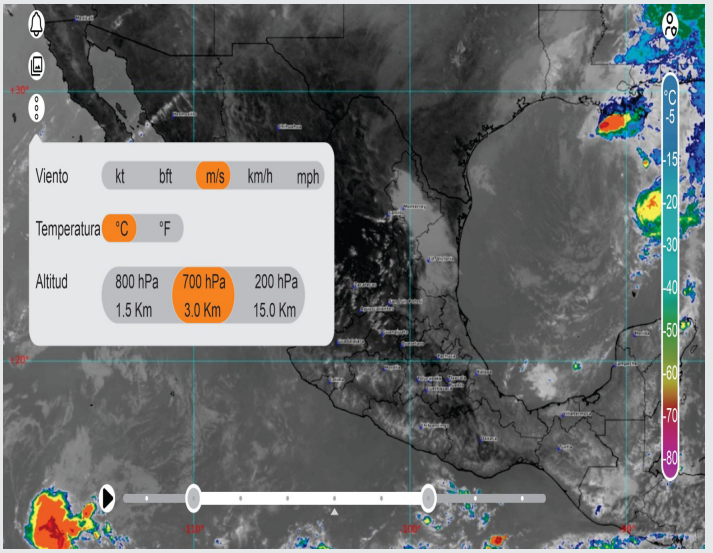


Figura 3: Configuración de parámetros.
Fuente: Elaboración propia.

solución funcional, flexible y escalable.

Entre los principales logros del proyecto se destacan:

- El uso exitoso de imágenes satelitales y del modelo GFS como fuentes de datos confiables para la generación de productos meteorológicos relevantes.
- La integración efectiva de tecnologías modernas como Django y React.js, permitiendo una arquitectura modular y mantenible.
- La capacidad de personalizar los productos generados según los criterios operativos del COE, lo que facilita la toma de decisiones en entornos de riesgo.

Este sistema no solo puede replicarse en otros campus de la misma Universidad, sino que también puede adaptarse a otras instituciones públicas con necesidades similares, promoviendo así una gestión del riesgo basada en la ciencia y la tecnología. La Universidad de Colima tiene una estrecha relación con la Dirección de Protección Civil Estatal, que ha mostrado interés en acceder a la información generada por el sistema de automatización y detección temprana de amenazas meteorológicas del COE, como instrumento adicional para la toma de decisiones. De concretarse la colaboración, la propuesta presentada tendrá un impacto positivo en la prevención y gestión de riesgos en todo el estado de Colima.

Los trabajos futuros incluirán la incorporación de algoritmos de aprendizaje automático para la detección de patrones críticos, así como la integración de sensores terrestres para complementar el análisis satelital.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Dirección General de Protección Civil y Gestión de Riesgos de la Universidad de Coli-

ma por su interés en implementar estas herramientas como parte del COE institucional.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2 de mayo de 2025), "Sixth Assessment Report: Climate Change 2021," 2021. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/.

[2] R. Basher, "Global early warning systems for natural hazards: Systematic and people-centred," Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 364, no. 1845, pp. 2167–2182, 2006, doi: 10.1098/rsta.2006.1819.

[3] J. M. Pérez and C. R. Torres, "Diseño de un sistema de visualización meteorológica basado en imágenes satelitales y modelos GFS para la gestión del riesgo en instituciones públicas," Memorias del Congreso Nacional de Ingeniería Aplicada, vol. 8, no. 1, pp. 55–61, 2020.

[4] P. E. Vargas and A. M. G. Tlaxcalteco, "México ante las migraciones climáticas y sus desafíos rumbo al 2030," Revista Iberoamericana de Derecho, Cultura y Ambiente, no. 5, p. 43, 2024.

[5] S. Sánchez and J. G. Ramírez, "Sistema de monitoreo y generación de alertas de prevención contra inundaciones con IOT," 2024. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/11349/93372

[6] T. J. Schmit, P. Griffith, M. M. Gunshor, J. M. Daniels, S. J. Goodman, and W. J. Lebair, "A closer look at the ABI on the GOES-R series," Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 98, no. 4, pp. 681–698, 2017.

[8] J. De Boer, J. A. Wardekker, and J. P. Van der Sluijs, "Frame-based guide to situated decision-making on climate change," Global Environmental Change, vol. 20, no. 3, pp. 502–510, 2010.

[9] R. I. V. Rodríguez, Software para el análisis de la verificación de la predicción climática de variables meteorológicas, Doctoral dissertation, Universidad de La Habana, 2020.

[10] M. Rivero, Desarrollo e implementación de una estación meteorológica basada en protocolos de IoT, Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2020.

[11] Universidad de Colima, "Suma UdeC 31 mil 476 estudiantes para el presente ciclo escolar," nota web, 20-Ago-2025. [En línea]. Disponible: https://www.ucol.mx/noticias/nota_14329.htm.

[12] R. U. R. Flores, R. T. A. Santos, I. A. Valdovinos y V. R. Licea, "Diseño electrónico del sistema de alerta temprana para monitoreo y detección de inundaciones," Difu100ci@, Revista de difusión científica, ingeniería y tecnologías, vol. 16, no. 3, pp. 50–57, 2022.

[13] E. Christian, C. Cerrudo, E. Viljoen, N. Cooper, R. Jackson, V. Gray y A. Robertson-Quimby, "Comunicar para salvar vidas: cómo mejorar los avisos de los sistemas de alerta temprana," 2022.

[14] T. L. C. Miranda, H. J. R. Herrera, J. B. M. Coaquira, W. E. S. Villanueva y M. A. M. Aguilar, "Sistema de alerta temprana de deslizamiento de tierra por lluvias basado en red inalámbrica de sensores en la ciudad de Tacna," Ingeniería Investiga, vol. 5, 2023, doi: 10.47796/ing.v5i0.855.

[15] P. B. Corrales, "Utilización de datos satelitales para la evaluación y mejora de los pronósticos numéricos en alta resolución a muy corto plazo," tesis doctoral, Fac. de Ciencias Exactas y Naturales, Univ. de Buenos Aires, 2023. [En línea]. Disponible en: https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/tesis/document/tesis_n7410_Corrales.

[16] A. J. Stewart, C. Robinson, I. A. Corley, A. Ortiz, J. M. Lavista Ferres y A. Banerjee, "Torchgeo: deep learning with geospatial data," ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems, vol. 11, no. 4, pp. 1–28, 2025, doi: 10.1145/3707459.

[17] J. Gutiérrez, J. F. Villa-Medina, A. Nieto-Garibay, and M. Á. Porta-Gándara, "Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 63, no. 1, pp. 166–176, 2014.

[18] M. Sugadev, M. Kaushik, V. Vijaykumar, and T. Ravi, "Implementation of NOAA Weather Satellite Receiver using HackRF-One SDR," in Proc. 2022 Int. Conf. Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2022, pp. 1–4.

Bioquímica y Biológicos

Ingeniantes

Análisis exploratorio del desempeño de esquemas de control clásico y avanzado. Caso de estudio: Reactores para la producción de bioetanol

Colaboración
Elena Elsa Bricio-Barrios, Tecnológico Nacional de México / campus de Colima; Héctor Hernández-Escoto; Fernando López-Caamal; Salvador Hernández-CastroUniversidad de Guanajuato; Santiago Arceo-Díaz, Tecnológico Nacional de México / campus de Colima

Fecha de recepción: 26 de noviembre de 2025
Fecha de aceptación: 04 de diciembre de 2025

RESUMEN: Este trabajo presenta la evaluación, mediante modelado numérico, del desempeño de un controlador PI sometido a perturbaciones térmicas simples y múltiples, comparando una técnica de sintonización analítica clásica por asignación de polos con una estrategia avanzada basada en redes neuronales. Los resultados muestran que este sistema altamente no lineal no requiere ser abordado directamente mediante estrategias avanzadas, sino que primero deben evaluarse los métodos clásicos. Por ejemplo, la asignación de polos no solo alcanzó un desempeño comparable al esquema basado en redes neuronales, sino que además no requiere poder de cómputo ni, en muchas ocasiones, software especializado para la obtención de las ganancias del controlador, las cuales pueden calcularse a papel y lápiz. Este resultado ejemplifica cómo un sistema altamente no lineal puede describirse mediante estrategias clásicas, favoreciendo el pensamiento crítico.

PALABRAS CLAVE: Bioetanol, Bioreactor continuo de tanque agitado, Controlador PI, método de asignación por polos, sintonización sistemática.

ABSTRACT: This study presents a numerical modeling–based evaluation of the performance of a PI controller subjected to single and multiple thermal disturbances, comparing a classical analytical tuning technique based on pole placement with an advanced strategy using neural networks. The results show that this highly nonlinear system does not need to be addressed directly through advanced strategies, but rather that classical methods should first be evaluated. For example, the pole-placement approach not only achieved performance comparable to the neural-network-based scheme, but also does not require computational power nor, in many cases, specialized software for determining the controller gains, which can be calculated using pencil and paper. This outcome illustrates how a highly nonlinear system can be described through classical strategies, promoting critical thinking.

KEYWORDS: Bioethanol, continuously stirred tank bioreactor, PI-controller, systematic tuning, pole-placement-method.

INTRODUCCIÓN

En el año 2023, el 81.5 % de la energía mundial se obtuvo de fuentes no renovables como el petróleo, el gas natural y el carbón, lo que sigue afectando los sistemas ambiental, social, económico y político [1].

En México, la gasolina representa el tercer mayor gasto en los hogares, sólo por debajo de la alimentación y la educación [2]. Aunque los vehículos eléctricos e híbridos han contribuido a reducir la demanda global de gasolina, su adopción en el país ha sido limitada: en 2022 representaron apenas el 5.3 % del parque vehicular [3]. Esta área de oportunidad ha impulsado la búsqueda de alternativas energéticas, entre las cuales el bioetanol ha sido una de las principales apuestas [4].

Inicialmente, la producción de bioetanol en México estuvo ligada al uso de maíz destinado al consumo humano, lo que generó preocupación por su impacto potencial en la seguridad alimentaria, dado que el maíz es un alimento básico en la dieta nacional. Como respuesta, se impulsó el uso de cultivos específicos destinados exclusivamente a la producción energética. Posteriormente, la atención se orientó hacia fuentes más sostenibles, como residuos agrícolas (incluidos los del propio maíz), biomasa forestal y desechos orgánicos provenientes de mercados y tianguis locales [5].

El bioetanol, también conocido como alcohol carburante, se obtiene por fermentación de azúcares reductores a partir de diversas materias primas. Su viabilidad operativa en procesos de fermentación continua depende del control preciso de variables clave como la dosificación de biomasa, sustrato y producto [6]. El aprovechamiento de residuos orgánicos no destinados a la alimentación humana ha permitido reducir la presión sobre los cultivos alimentarios y ha mejorado la factibilidad ambiental y económica de este biocombustible como sustituto parcial de la gasolina.

El control de temperatura de la mezcla reaccionante en el interior del térmico tiene un efecto directo en la estabilidad del sistema y la tasa de crecimiento microbiano [7]. Esta variable, además de ser manipulable, puede alterar la dinámica del proceso sin modificar el medio. Por tanto, la incorporación de un esquema de control de temperatura es indispensable en esta operación unitaria.

Por otro lado, el proceso de fermentación y control de temperatura ha sido descrito eficientemente mediante modelos matemáticos. En específico, Nagy en [8] propuso un modelo basado en redes neuronales con acción de corrección en línea, que superó a controladores PID sintonizado por Zigler-Nichols y lineales tradicionales.

Las redes neuronales artificiales son modelos computacionales inspirados en el funcionamiento del cerebro humano. Su estructura se basa en capas de nodos interconectados, denominados neuronas artificiales, que procesan información mediante funciones de activación y conexiones ponderadas. Estas redes aprenden a reconocer patrones complejos ajustando iterativamente los pesos sinápticos entre neuronas durante un proceso de entrenamiento supervisado o no supervisado. Gracias a esta capacidad, se han aplicado con éxito en tareas como clasificación de señales, predicción de series temporales, reconocimiento de voz e imágenes, entre otras [9].

En el área del control automático, las redes neuronales han sido empleadas para la sintonización en línea de controladores, como los de tipo PID o PI. En esta configuración, la red neuronal actúa como un módulo adaptativo que recibe información del estado del sistema en tiempo real y ajusta dinámicamente los parámetros del controlador (ganancias proporcional, integral y derivativa), de modo que se optimice su respuesta frente a perturbaciones o cambios en las condiciones de operación [8].

No obstante, su implementación presenta áreas de oportunidad respecto a métodos tradicionales de sintonización como el entrenamiento efectivo de una red neuronal que requiere una cantidad considerable de datos experimentales representativos del sistema, así como la demanda computacional para entrenar el modelo y su validación cruzada. A ello se suma la dificultad de interpretación: las redes neuronales son comúnmente consideradas “cajas negras”, lo que limita la comprensión directa de su lógica interna y complica su validación en entornos regulados o de misión crítica [10].

Por otro lado, las redes son sensibles a problemas como el sobreajuste y la mala escalabilidad de datos, lo que puede comprometer la robustez del controlador adaptativo. Finalmente, su demanda computacional es considerablemente mayor que la de métodos heurísticos clásicos como Ziegler–Nichols, Cohen–Coon o técnicas basadas en asignación de polos que son menos flexibles pero su implementación es analítica y relativa facilidad de implementación en sistemas industriales con recursos limitados [11].

El desempeño del esquema de control dependerá en gran medida de la sintonización de los parámetros [8]. No obstante autores como, Somefun y cols. en [12] señalan que la inversión en esta etapa repercute directamente en el costo del proceso, por tanto, es de interés evaluar el desempeño de estrategias de sintonización clásicas y avanzadas en un sistema altamente no lineal, como lo es un bioreactor de tanque agitado en operación continua,

Este trabajo propone una estrategia de control de temperatura para reactores continuos mediante un controlador PI lineal sintonizado con la técnica de asignación de polos estables, la cual ha mostrado alto desempeño en sistemas altamente no lineales como procesos fermentativos y columnas de destilación [12, 13].

MATERIAL Y MÉTODOS

Modelo matemático

Se seleccionó el modelo matemático de Nagy en [8], que describe un bioreactor de tanque agitado con chaqueta de enfriamiento operado en régimen continuo, donde se fermentan azúcares reductores para producir bioetanol (Figura 1).

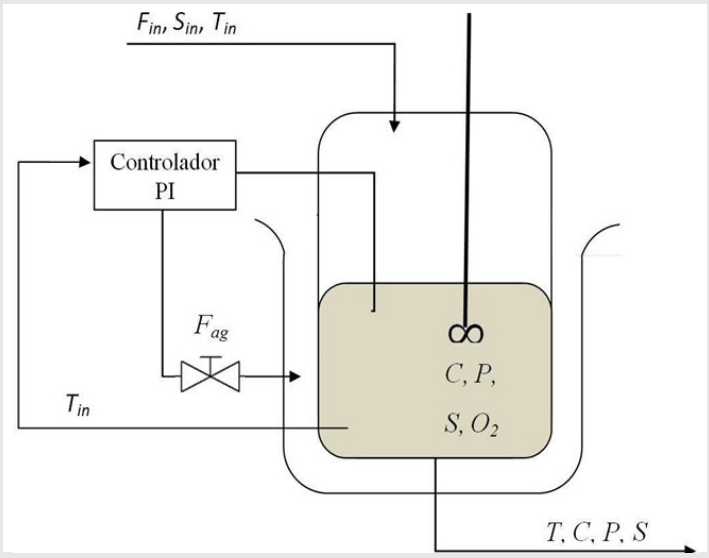


Figura 1. Diagrama de un bioreactor de tanque agitado en operación continua.
Fuente: Elaboración propia.

El modelo descrito mediante siete ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales, los balances de materia y energía, junto con relaciones cinéticas tipo Monod que consideran la inhibición por etanol y la influencia de los nutrientes. El espacio de estados, entradas, salidas y perturbaciones se muestran en la Ec. 1.

$$\dot{x} = r(x,d) + \Pi \cdot \frac{F_J}{V_J}(T_{J,in} - T_J), \quad x(0) = x_0; \quad y_T = T$$

$$donde \quad x = (C,S,P,O_2,V,T,T_J), \quad d = (F_{in},F_{out},S_{in},T_{in}) \qquad \text{(Ec 1)}$$

$$r(\circ) = \left(r_C(x,d), \quad r_S(x,d), \quad ..., \quad r_T(x,d), \quad r_{T_J}(x,d) \right),$$

donde los estados del sistema (x), corresponden a la concentración de biomasa (C), sustrato (S), producto (P), oxígeno disuelto (O_2) y volumen del reactor (V), y los fenómenos térmicos: temperatura del reactor (T) y de la chaqueta (T_J). Mientras que, las perturbaciones externas (d) como los flujos de entrada y salida (F_{in}, F_{out}), la concentración de azúcar en la alimentación (S_{in}) y la temperatura de entrada (T_{in}). El término $r(\circ)$ representa el vector de tasas de reacción dependientes de los estados y entradas, asociado a procesos como crecimiento microbiano, consumo de sustrato, producción de producto y transferencia de oxígeno.

Con base al trabajo realizado por Nagy en [8] se incorporaron las condiciones iniciales: (C, S, P, O_2, V, T, T_J) = (0.9047 g/L, 29.7389 g/L, 12.5152 g/L, 3.1695 g/L, 1000 L, 29.5732 °C, 27.0539 °C) y las condiciones de operación fueron: (F_{in}, F_{out}, S_{in}, T_{in}, $T_{J\,in}$) = (51 L/h, 51 L/h, 60 g/L, 25 °C, 15 °C).

El Sistema de Control

Se consideró un controlador lineal de tipo Proporcional-Integral (PI) expresado mediante la Ec. 2 :

$$F_J(t) = \bar{F}_J + K_C \cdot (\bar{T} - y_T(t)) + \frac{K_C}{\tau_I}\int_0^t (\bar{T} - y_T(t)) \cdot d\tau \qquad \text{(Ec 2)}$$

donde $u(t)$ representa la señal de control (en este caso, el flujo de fluido en la chaqueta (F_J), y e(t) es el error entre la temperatura deseada y la temperatura actual del reactor y, de este modo, la temperatura del reactor (T), o su medición (y_T) converja hacia un valor de referencia, utilizando como punto de partida el valor nominal de F_J.

Estrategia de sintonización de parámetros

Para describir la dinámica del sistema, se observa que la naturaleza no lineal de la Ec. 1 donde se observa que el grado relativo entre T y T_J es dos, permitiendo modelar el sistemas a un modelo de segundo orden sobreamortiguado.

A continuación, se evaluó la técnica de sintonización propuesta por Zavala en [13] descrita en la Ec. 3:

$$K_C = \frac{2n-1}{K_P}\ \tau_I = \tau_P \cdot (\xi_R)^2 \cdot \left(\frac{2n-1}{n^2}\right) \qquad \text{(Ec 3)}$$

donde la ganancia de proceso (K_P) y la constante de tiempo (τ_P) es la sensibilidad y velocidad de respuesta de control, el factor de amortiguamiento deseado (ξ_R) y el parámetro n.

Si bien, el valor de ξ_R es una variable de libre elección, es sabido que magnitudes bajas generan respuestas más rápidas pero con sobreoscilaciones, mientras que valores altos generarán una respuesta más suave pero el retorno al valor deseado será más lento [11].

Por otro lado, el parámetro n define cuántas veces más rápido se desea que responda el sistema controlado respecto al original, modulando así las oscilaciones abruptas del controlador.

Perturbaciones externas

Para evaluar el desempeño de las estrategias de sintonización de las redes neuronales respecto a la asignación de polo se propusieron dos escenarios:

i) Cambio de valor de referencia (set-point) en la temperatura del reactor donde se construyó una perturbación de temperatura 23 °C a 25 °C, equivalente a una

actividad microbiana excesiva ocasionada por factores externos como dosificación excesiva de nutrientes ricos en fuentes de azúcares de fácil reducción [15].

ii) Control regulatorio frente a perturbaciones se creó un conjunto de perturbaciones de tipo escalón donde se pretende que la acción de control retorne al valor preasignado. Tras permanecer a 29 °C durante 50 horas, se pretende que el sistema alcance 32 °C durante 300 horas. A continuación, la temperatura retorna a la temperatura inicial otras 300 horas y desciende a hasta 27 °C.

RESULTADOS

Control de temperatura ante cambios en el set-point

Para contrarrestar esta perturbación, se aplicó nuevamente el controlador PI con la técnica de sintonización por asignación de polos. Como primera etapa, se evaluó el efecto del parámetro n (n=1 vs n=10), en la dinámica transitiva de este caso de estudio. La Figura 2 muestra en la parte superior la acción del flujo de refrigeración ante dicha perturbación y, en la inferior, cómo afecta la concentración de producto.

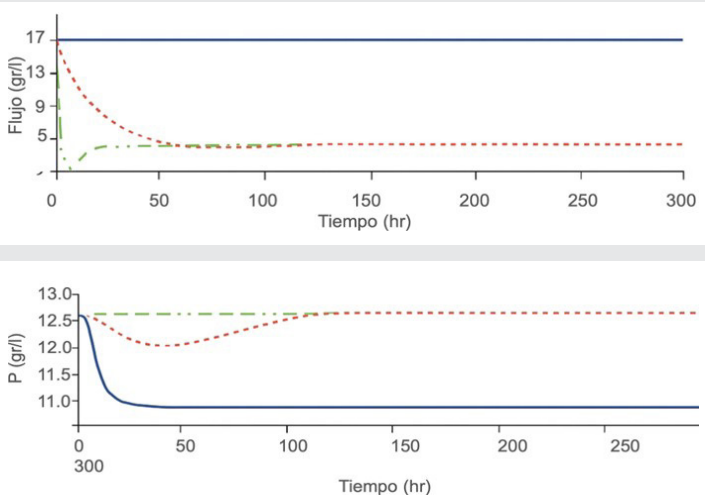


Figura 2. Desempeño del sistema ante una perturbación de temperatura en el interior del reactor. La línea azul corresponde al sistema en lazo abierto, la roja es n=1 y el verde es n=10-. Fuente: Elaboración propia.

En la parte superior de la Figura 2 se muestra la respuesta del flujo de refrigerante. Al aumentar el parámetro n, el sistema mejora su capacidad para rechazar rápidamente la perturbación térmica. Esto se refleja en una respuesta más rápida y estable del sistema controlado con n = 10, en comparación con n = 1, el cual presenta una desaceleración más prolongada antes de alcanzar el valor de referencia.

No obstante, este aumento en el desempeño dinámico tiene un costo: la magnitud del flujo de refrigerante requerido es más abrupta cuando n sea alto. Esta respuesta agresiva puede representar un riesgo práctico, ya que un incremento súbito y sostenido del flujo puede generar un desgaste acelerado del actuador de control, así como una posible afectación térmica sobre el cultivo microbiano, especialmente si se trata de levaduras sensibles a choques térmicos. En consecuencia, aunque valores altos de n mejoran la velocidad de respuesta, su implementación debe evaluarse cuidadosamente en función de los límites operativos del sistema físico.

En la parte inferior de la Figura 2 se observa el comportamiento de la concentración del producto. Aquí también se evidencia que, aunque los tres escenarios convergen al mismo valor estacionario, los tiempos de estabilización difieren. El sistema en lazo abierto muestra oscilaciones prolongadas, mientras que n = 10 estabiliza la variable en menor tiempo. Sin embargo, se observa una caída inicial más pronunciada del producto en este caso, lo que puede traducirse en pérdida de rendimiento temporal.

Control Regulatorio frente a perturbaciones de tipo escalón

Establecido de forma estocástico, se eligió el parámetro n = 1, para ahora, establecer la robustez de la técnica de sintonización ante un sistema regulatorio, La Figura 3 muestra en la parte superior la temperatura en el interior del reactor y, en la inferior, la acción del flujo de refrigeración ante dicha perturbación.

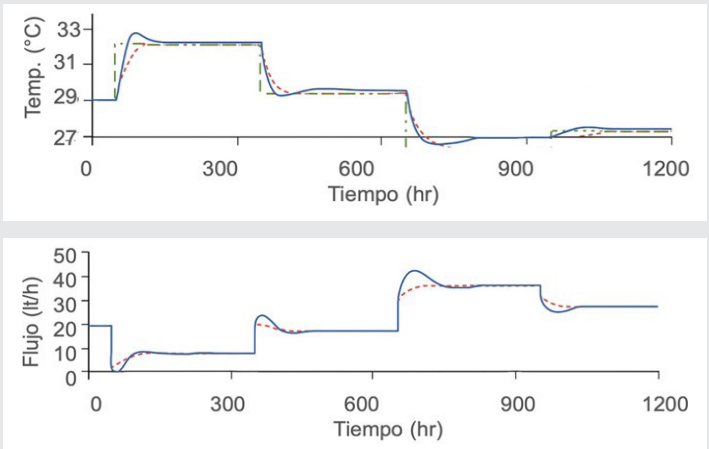


Figura 3. Desempeño de sistemas de control en escenarios de cambios de temperatura. La línea azul corresponde a las redes neuronales, la roja a la propuesta y el verde el set-point. Fuente: Elaboración propia.

En la parte superior de la Figura 3 se observa la evolución de la temperatura del reactor ante múltiples cambios escalonados en el set-point. Ambas estrategias de control presentan un desempeño comparable en términos de estabilidad y tiempo de establecimiento. Si bien el controlador basado en redes neuronales muestra una respuesta con un ligero sobreimpulso inicial (trayectoria sobreamortiguada), y el controlador por

asignación de polos presenta una respuesta más rápida con menor sobreoscilación, en ambos casos el sistema logra alcanzar el valor deseado con precisión y en tiempos similares. Esto indica una buena capacidad de seguimiento del set-point bajo condiciones de operación variables.

En la parte inferior de la Figura 3 se representa la señal de control, es decir, el flujo del fluido refrigerante requerido para mantener la temperatura dentro de los valores establecidos. Se aprecia que el controlador sintonizado por asignación de polos genera una trayectoria de control más suave y menos exigente en comparación con el esquema basado en redes neuronales, el cual presenta picos más pronunciados y cambios abruptos en varios tramos del perfil.

Discusión

Este caso de estudio evaluó la regulación térmica en reactores de fermentación continua donde pequeñas oscilaciones de temperatura pueden comprometer la capacidad de replicación de la biomasa en el proceso fermentativo [ss].

El control de la temperatura en bioreactores es importante durante las fermentaciones y cultivos celulares para evitar sobrecalentamientos y oscilaciones que afecten negativamente el crecimiento microbiano. Aunque estos sistemas suelen clasificarse como lentos, los sobretiros de temperatura pueden poner en riesgo la capacidad de replicación de la biomasa y comprometer la estabilidad del lote. [16] Además, un sistema de calefacción y refrigeración eficiente debe mantener la uniformidad térmica para prevenir daños al metabolismo celular y asegurar la calidad del producto final. La temperatura influye directamente en la velocidad metabólica de la biomasa [17].

Lisci et al. en [18] reporta la importancia del control de temperatura: desde una perspectiva de bioprocesos, en sistemas con set-point se pretende mantener una variable del proceso (como temperatura, pH, oxígeno disuelto) en un valor objetivo específico y constante, que favorecerá el crecimiento de la biomasa a la par de asegurar la estabilidad y eficiencia del proceso. Mientras que, los sistemas regulatorios, buscan enviar la variable controlada dentro de un rango aceptable ante perturbaciones externas o internas inesperadas que puedan afectar el proceso, buscando resistir y corregir estas perturbaciones para minimizar su daños al producto o a la biomasa.

Un elemento clave en el desempeño de un controlador, es la sintonización de los parámetros. En este estudio se evalúo la asignación de polos respecto a las redes neuronales. El primer esquema se obtiene mediante un proceso analítico donde parámetros pueden ajustarse a partir de la respuesta del proceso, permitiendo controlar explícitamente el tiempo de establecimiento y el grado de amortiguamiento para evitar sobretiros, incluso en sistemas altamente no lineales [13].

Por otro lado, las redes neuronales incorporan capacidad adaptativa al ajustar las ganancias en función del estado del sistema, lo que puede mejorar la respuesta transitoria ante perturbaciones externas. No obstante su desempeño depende del entrenamiento del modelo y de la variabilidad del proceso. Aunado a ésto, aquellas personas que mostró en la construcción de estos esquemas suele emplear software especializado, así alta demanda de poder computacional, limitando significativamente el pensamiento crítico frente al caso de estudio [19].

CONCLUSIONES

Este trabajo evaluó el desempeño de dos estrategias de sintonización de parámetros para un controlador PI, orientadas a la regulación simple y múltiple de la temperatura en un reactor de fermentación continua.

Los resultados mostraron que la técnica basada en asignación de polos permite alcanzar el valor deseado de forma efectiva al incrementar el parámetro n. No obstante, valores excesivamente altos generan una respuesta sobreamortiguada, lo que puede aumentar el desgaste del actuador y comprometer su vida útil. En decir, un incremento moderado de n representa un compromiso adecuado entre velocidad de respuesta, estabilidad y esfuerzo de control. Por tanto, la selección óptima de este parámetro debe considerar el comportamiento dinámico esperado así como las limitaciones físicas y biológicas del proceso fermentativo.

Por otro lado, al comparar esta estrategia con la sintonización basada en redes neuronales en escenarios con múltiples perturbaciones térmicas, se observó que ambos enfoques logran estabilizar el sistema en tiempos similares. Estos resultados indican que, al menos para este caso de estudio, el método analítico clásico puede competir en desempeño con técnicas más avanzadas de control inteligente.

Desde una perspectiva práctica, la estrategia basada en asignación de polos mostró un comportamiento más suave en la señal de control, lo cual implica una menor exigencia sobre los actuadores, menor consumo energético y mayor viabilidad para su implementación en entornos industriales. Aunque ambos métodos resultan viables, esta ventaja operativa convierte al enfoque clásico en una alternativa robusta, eficiente y fácilmente aplicable para el control térmico de biorreactores en operación continua.

Como trabajo futuro, se plantea enriquecer la técnica de sintonización por asignación de polos mediante la incorporación de un algoritmo que proponga y evalúe de forma automática los valores óptimos de los parámetros de diseño, específicamente ξR y el parámetro

de rapidez relativa (n). De esta manera, se podrá abordar de forma simultánea el desempeño dinámico del sistema y el esfuerzo requerido por el actuador.

Para lograrlo, se plantea el uso de métodos de cálculo variacional que permitan definir una función objetivo compuesta por dos términos: uno asociado al cumplimiento del set-point (calidad del producto) y otro relacionado con la magnitud y variabilidad de la señal de control como el costo energético y desgaste del actuador.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Carbon Brief. (2024). Analysis: Wind and solar added more to global energy than any other source in 2023. https://www.carbonbrief.org/analysis-wind-and-solar-added-more-to-global-energy-than-any-other-source-in-2023/.

[2] ENIGH. (2022). Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). https://www.inegi.org.mx/programas/enigh/nc/ 2022/.

[3] Núñez, H. M. (2023). Building a bioethanol market in Mexico. EconoQuantum, 19(2), 21–56. https://doi.org/10.18381/eq.v19i2.7258.

[4] Zabed, H., Sahu, J. N., Boyce, A. N., & Faruq, G. (2023). Recent developments in bioethanol production from lignocellulosic biomass: A review. Bioresource Technology Reports, 22, 101458. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101458.

[5] Deenanath, E. D., Iyuke, S., & Rumbold, K. (2012). The bioethanol industry in sub‐Saharan Africa: history, challenges, and prospects. BioMed Research International, 2012(1), 416491.

[6] López, P., Feldman, H., Mauricio-Iglesias, M., Junicke, H., Huusom, J. K., & Gernaey, K.V. (2021). Benchmarking real-time monitoring strategies for ethanol production from lignocellulosic biomass. Biomass and Bioenergy, 127, 105296. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.10529 6.

[7] Kula, K. S. (2024). Tuning a PI/PID Controller with Direct Synthesis to Obtain a Non-Oscillatory Response of Time-Delayed Systems. Applied Sciences, 14(13), 5468. https://doi.org/10.3390/app14135468.

[8] Nagy, Z. (2007). Model based control of a yeast fermentation bioreactor using optimally designed artificial neural networks. Chemical Engineering Journal, 127(1–3), 95–109. https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.09.014.

[9] Alvarado, R. H. (2016). Control auto-sintonizado utilizando redes neuronales (Tesis doctoral). Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. https://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1024/301.

[10] Santos, S. O. (2014). Sintonización de un controlador PID basado en un algoritmo heurístico para el control de un Ball and Beam. https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/431

[11] O'Dwyer, A. (2000). A summary of PI and PID controller tuning rules for processes with time delay. Part 1: PI controller tuning rules. Proceedings of the PID IFAC Workshop on Digital Control, 175–180. https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)38246- 0.

[12] Somefun, O. A., Akingbade, K., & Dahunsi, F. (2021). The dilemma of PID tuning. Annual Reviews in Control, 52, 65–74. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.03.003.

[13] Zavala, A., Hernández, H., Hernández, S., & Segovia, J. (2012). Conventional proportional-integral (PI) control of dividing wall distillation columns: Systematic tuning. Industrial & Engineering Chemistry Research,55(38), 10869–10880. https://doi.org/10.1021/ie300502

[14] Bricio, E., Millán, P., Díaz, S., Ramírez, J., & Torres, J. (2020). Application of thermodynamics and mathematical modeling on the optimization of the feeding flux rate on a fermentation process as a closed system. Journal of Physics: Conference Series, 1645(1), 012001. doi:10.1088/1742-6596/1645/1/012001

[15] Wakil, M. A., Oladipo, A. A., Ismail, S. O., & Salami, M. U. (2023). Temperature variations effect on bioethanol production from lignocellulosic biomass using locally developed small-scale production facility: A pilot study. Renewable Energy Research and Applications, 5(2), 103–110. https://www.researchgate.net/publication/373059430.

[16] González-Hernández Y., Michiels E., Perré P. Heat of reaction in individual metabolic pathways of yeast determined by mechanistic modeling in an insulated bioreactor. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. Springer Nature, 17, 1, 137, 2024.

[17] Higginson A., Brooks K. A bioreactor system remote laboratory for teaching process control. IFAC-PapersOnLine. IFAC, 55, 17, 350–355, 2022.

[18] Lisci S., Grosso M., Tronci S. Different control strategies for a yeast fermentation bioreactor. IFAC-PapersOnLine. IFAC, 54, 3, 306–311, 2021.

[19] Moya Almeida V. Desarrollo de un sistema de predicción y control de solventes durante la fermentación de cerveza con S. cerevisiae mediante redes neuronales y lógica difusa. Tesis doctoral, Universidad Agronómica, 2023.

Multidisciplinario e ingenierías

Ingeniantes

Implementación de un dispositivo IoT para el monitoreo del dolor en niños a través de variables fisiológicas

Colaboración
Verónica Guzmán Sandoval; Miguel Sebastián Frausto Zapata; José Enrique Guerrero Pérez; Juan Diego Terriquez Polanco; Pedro César Santana Mancilla, Universidad de Colima

Fecha de recepción: 25 de agosto de 2025
Fecha de aceptación: 10 de septiembre de 2025

RESUMEN: El manejo adecuado del dolor pediátrico es esencial en la práctica médica, pero presenta desafíos significativos debido a la subjetividad y limitaciones comunicativas en pacientes infantiles. Este trabajo presenta el diseño y desarrollo de un dispositivo IoT para la monitorización continua del dolor infantil mediante variables fisiológicas objetivas, específicamente frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno (SpO_2). Utilizando el sensor MAX30102, un microcontrolador ESP32 y una interfaz móvil desarrollada en Flutter, el dispositivo permite la captura y visualización en tiempo real de estos parámetros. Los resultados preliminares, obtenidos bajo condiciones simuladas controladas, muestran un funcionamiento estable y coherente en la adquisición de las variables fisiológicas seleccionadas. A pesar de que no se realizaron comparaciones directas con dispositivos de referencia, los hallazgos respaldan la viabilidad técnica del prototipo. Si bien su desempeño depende de la precisión del sensor integrado y no se incorporaron mejoras adicionales en la captura de datos en esta fase, el sistema representa un paso inicial hacia la construcción de herramientas objetivas de monitoreo del dolor infantil, con la necesidad de integrar biomarcadores adicionales y validación clínica en estudios futuros.

PALABRAS CLAVE: Dolor infantil, Frecuencia cardíaca, IoT en salud, Monitorización fisiológica.

ABSTRACT: Effective management of pediatric pain is essential in medical practice, but it poses significant challenges due to the subjectivity of assessment and the communication limitations of young patients. This study presents the design and development of an IoT device for continuous monitoring of pediatric pain through objective physiological variables, specifically heart rate and blood oxygen saturation (SpO_2). Using the MAX30102 sensor, an ESP32 microcontroller, and a mobile interface developed in Flutter, the device enables real-time acquisition and visualization of these parameters. Preliminary results, obtained under controlled simulated conditions, demonstrate stable and consistent performance in acquiring the selected physiological variables. Although no direct comparisons with reference devices were conducted, the findings support the technical feasibility of the prototype. While its performance depends on the accuracy of the integrated sensor and no additional enhancements in data capture were included at this stage, the system represents an initial step toward developing objective tools for pediatric pain monitoring, with the need to integrate additional biomarkers and clinical validation in future studies.

KEYWORDS: Pediatric pain; Heart rate; IoT in healthcare; Physiological monitoring.

INTRODUCCIÓN

El dolor es una experiencia sensorial y emocional desagradable y compleja porque involucra parámetros fisiológicos, emocionales, cognitivos y conductuales [1].

La evaluación y el manejo adecuado del dolor constituyen un derecho humano en la atención pediátrica integral. El dolor no solo impacta el bienestar inmediato del niño, sino que también influye significativamente en su recuperación y cuadro clínico, debido a que es un estímulo adverso que desencadena una respuesta del Sistema Nervioso Autónomo (SNA), que se manifiesta en respuestas simpáticas que se manifiestan en parámetros como la frecuencia cardíaca (FC), frecuencia respiratoria (FR) y tensión arterial (TA). No obstante, estos indicadores clásicos, utilizados de forma aislada, no evalúan todo el espectro del dolor. Investigaciones más recientes se han centrado en biomarcadores no invasivos de la actividad del SNA, como la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC o HRV) y la Actividad Electrodérmica (AED o EDA). La VFC, que refleja el balance simpático-vagal, ha mostrado alteraciones en niños con dolor crónico y agudo. La AED, que mide cambios en la conductancia de la piel debidos a la actividad simpática de las glándulas sudoríparas, se ha correlacionado con la respuesta a estímulos dolorosos en diversas poblaciones, incluyendo neonatos.

A pesar de conocer los correlatos del dolor con variables fisiológicas no se incluyen en todas las escalas del dolor. Entonces, la evaluación del dolor en la población pediátrica presenta desafíos importantes, derivados de la etapa de desarrollo cognitivo y la capacidad de comunicación del niño, así como, en centrarse en la evaluación de parámetros emocionales y conductuales. Estas dificultades se agravan en pacientes preverbales, no verbales o con condiciones como el Trastorno del Espectro Autista (TEA), donde la incapacidad para expresar verbalmente el sufrimiento no niega su existencia ni la necesidad urgente de intervención. La evaluación inadecuada y la falta de un tratamiento oportuno del dolor pueden conllevar secuelas significativas, incluyendo la cronificación del dolor y un impacto negativo en la calidad de vida del niño [2].

Las metodologías actuales para evaluar el dolor pediátrico, aunque validadas para ciertos contextos, presentan ciertas limitaciones, por ejemplo: se centran más en las escalas de autoinforme, como las escalas visuales analógicas (EVA), de caras o numéricas, las cuales dependen críticamente de la capacidad cognitiva y comunicativa del niño, restringiendo su uso en edades tempranas o en pacientes con alteraciones neurológicas. Por otro lado, las escalas observacionales basadas en el lenguaje no verbal y la conducta (ej., FLACC que es una escala no verbal de valoración del dolor en niños con alteraciones neurocognitivas; la escala Neonatal Infants Pain Scale (NIPS), que es una escala para valoración del dolor en neonatos (0 días-1 mes); Escala de CARAS-REVISADA que realiza una valoración del dolor en niños entre 3 y 7 años [3], si bien útiles en pacientes, requieren entrenamiento específico del observador y pueden carecer de especificidad, confundiendo las manifestaciones del dolor con otros necesidades. Por ejemplo, en el caso de los niños con dolor oncológico, existe una necesidad fehaciente de evaluar constantemente su dolor por la cantidad de tratamientos clínicos invasivos y, la monitorización digital es una alternativa eficiente; a este respecto en el metanálisis de Simon et al. [3], se encontraron 14 aplicaciones de monitorización para niños de 0 a 18 años, en 121 publicaciones de bases de datos, que usaron pulseras digitales para medir el dolor, su eficacia fue probada. Por su parte en otro estudio realizado con una aplicación para monitoreo y tratamiento del dolor encontraron menor dolor en los niños que usaron dicha aplicación y mayor satisfacción en los padres que en los niños que no tuvieron la atención con la aplicación de monitoreo del dolor [4].

No existe un método universalmente aplicable a toda la población de niños, evidenciando una brecha crítica entre la necesidad clínica de una evaluación fiable y las herramientas disponibles actualmente [5]. Ante estas limitaciones, la exploración de variables fisiológicas como indicadores objetivos de la respuesta al dolor ha ganado interés.

La complejidad de la respuesta al dolor sugiere que un enfoque multimodal, integrando varias señales fisiológicas mediante técnicas de procesamiento avanzado como el Machine Learning (ML), es necesario para mejorar la precisión y fiabilidad. El avance reside en reconocer patrones complejos a partir de múltiples flujos de datos, más que en identificar un único marcador fisiológico [6], [7], [8].

En el ámbito pediátrico, las problemáticas principales para la instrumentación tecnológica incluyen la necesidad de sensores de bajo consumo y no invasivos que sean tolerables para el niño, la transmisión inalámbrica confiable de datos en tiempo real y la interpretación inicial de parámetros fisiológicos sin generar molestias adicionales. El diseño propuesto aborda estas necesidades mediante la integración de un sensor óptico (MAX30102) con un microcontrolador de conectividad nativa (ESP32) y una aplicación móvil que permite visualización continua. Aunque en esta fase no se implementaron algoritmos completos de clasificación de dolor, se incorporaron rangos de referencia reportados en la literatura para frecuencia cardíaca y SpO$_2$ como base preliminar para la detección de estados de alerta. La definición de umbrales clínicos y el desarrollo de reglas para la identificación automática del dolor se establecen como un objetivo explícito de futuras fases del proyecto.

El desarrollo exponencial de la tecnología del Internet de las Cosas (IoT), y en particular del Internet de las Cosas Médicas (IoMT), junto con la miniaturización de sensores vestibles (wearables), ofrece una oportunidad sin precedentes para la monitorización continua y no invasiva de la salud pediátrica. Estas tecnologías permiten la captura remota de datos fisiológicos en

tiempo real, superando las limitaciones logísticas de las evaluaciones tradicionales, que son a menudo puntuales y restringidas al entorno clínico. Esta infraestructura tecnológica habilita el desarrollo de sistemas prácticos y continuos para la monitorización objetiva del dolor pediátrico, basados en la adquisición de señales como la VFC y la AED en el entorno natural del niño [9].

Ante estas limitaciones, este artículo presenta el diseño y desarrollo de un prototipo de dispositivo IoT específicamente concebido para la monitorización del dolor en niños a través de la medición continua de variables fisiológicas asociadas a la respuesta del SNA, como la VFC y la AED. El sistema está diseñado considerando las necesidades de la población pediátrica, incluyendo aquellos con dificultades de comunicación. La contribución de este trabajo radica en la propuesta de una arquitectura hardware-software integrada, la selección y validación de sensores apropiados para uso pediátrico, y el desarrollo inicial de algoritmos para el procesamiento de las señales fisiológicas capturadas. Con este desarrollo, se busca ofrecer una herramienta complementaria para abordar la brecha existente en la evaluación objetiva y continua del dolor pediátrico, aprovechando las sinergias entre la fisiología, la tecnología de sensores y el paradigma IoT.

Revisión de literatura

La investigación en el campo del monitoreo y manejo del dolor en niños, ha desvelado las complejidades de esta experiencia única. La definición misma del dolor en niños destaca que va más allá de una simple sensación física, incorporando elementos emocionales y cognitivos en su naturaleza. Esta perspectiva subraya la necesidad de adoptar enfoques holísticos que reconozcan el dolor [10].

En este contexto, las diferencias entre la percepción del dolor en niños y adultos se han convertido en un área de exploración fundamental. Los factores biológicos y psicosociales influyen en cómo los niños interpretan y reaccionan al dolor. El hecho de que los niños presten atención intensificada al dolor, amplificando sus aspectos sensoriales, subraya la importancia de abordar también los aspectos emocionales y psicológicos. Esta comprensión recalca la necesidad de considerar el dolor infantil como una experiencia multidimensional [10].

La evaluación del dolor en pacientes pediátricos es un desafío importante porque los niños no tienen la capacidad verbal para describir el dolor de manera efectiva y la percepción del dolor puede variar según la edad y el desarrollo cognitivo. Por lo tanto, es fundamental medir variables fisiológicas en la evaluación del dolor pediátrico. La medición de estas variables puede brindar información objetiva sobre la intensidad y la naturaleza del dolor, lo que ayuda a los médicos a elegir la opción de tratamiento adecuado [11].

El dolor tiene un componente cognitivo, emocional, conductual y fisiológico. Dentro de los parámetros fisiológicos que se alteran con el dolor se encuentra la frecuencia cardíaca, la frecuencia respiratoria y la presión arterial [11], [12], [13]. Estas variables pueden ser medidas mediante el uso de monitores de signos vitales y la evaluación suele ser menos invasiva, más precisa y objetiva, que algunas escalas psicológicas. Pero aun así es fundamental usar dispositivos válidos y adaptados, esto insta a abordar la evaluación del dolor infantil con sensibilidad y comprensión [14], [15].

Entonces la evaluación del dolor en niños debería ser integral, innocua y de calidad para esta población [10]. La investigación multidisciplinaria y los avances en tecnología han proporcionado alternativas a la evaluación y el manejo del dolor. En este sentido se han empleado diseños centrados en el Internet de las Cosas médicas (IoMT, por sus siglas en inglés) [8], [16].

Los dispositivos que usan IoMT están desempeñando un papel cada vez más relevante en la atención médica y continuarán haciéndolo en el futuro debido al crecimiento de la medicina, la complejidad de las enfermedades, la brecha de acceso a los servicios de salud y la vulnerabilidad de grupos, como es la población infantil [17]. Además, destaca que la categoría de IoMT no se limita a dispositivos específicos, ya que incluso los teléfonos móviles, pueden funcionar como IoMT al monitorear datos de salud. Ejemplos adicionales incluyen inhaladores inteligentes, medidores de glucosa en sangre y sistemas de administración de medicamentos.

El uso de tecnologías como el IOT puede proporcionar una solución a esta problemática al permitir la monitorización de signos vitales como la frecuencia respiratoria y saturación de oxígeno; además de monitorear el dolor de los niños de manera remota y en tiempo real, lo que permite a los médicos y cuidadores hacer un seguimiento de la efectividad del tratamiento y ajustar el manejo del dolor en consecuencia [18].

A pesar de estos avances, aún existe una necesidad crítica por desarrollar y validar sistemas integrados específicos para la población pediátrica, especialmente aquellos pacientes que presentan limitaciones severas de comunicación o trastornos del desarrollo. En este contexto, el presente trabajo explora una solución tecnológica integrada basada en IoT para contribuir a cubrir esta brecha clínica y tecnológica.

MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología de este trabajo se limitó a demostrar la viabilidad técnica del prototipo en fases tempranas de maduración tecnológica (TRL 2–3). El desarrollo incluyó la integración de sensores, microcontrolador y aplicación móvil, así como la validación funcional en condiciones simuladas. En esta etapa no se abordó la correlación clínica de los parámetros fisiológicos con

la intensidad del dolor, ni la definición de reglas diagnósticas, aspectos que forman parte de fases posteriores de investigación. De este modo, el alcance del presente artículo corresponde a la implementación y validación técnica inicial del dispositivo.

Investigación básica

En esta primera fase se realizó una revisión exhaustiva de la literatura científica existente sobre la evaluación del dolor infantil, medición de variables fisiológicas relevantes y tecnologías emergentes relacionadas con el IoT. El objetivo principal fue establecer una sólida base conceptual y técnica que permitió definir las especificaciones y funcionalidades necesarias del dispositivo IoT propuesto para el monitoreo del dolor pediátrico.

Desarrollo tecnológico

En el nivel TRL 2, con base en la fase previa, se determinaron de manera precisa las variables fisiológicas clave necesarias para evaluar el dolor infantil, específicamente la Variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) y la saturación de oxígeno. Los detalles técnicos del sensor se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del sensor.

Sensor	Modelo	Parámetros medidos	Precisión	Protocolo
Frecuencia cardíaca y SpO2	MAX30102	FC, SpO2	±2%	I2C

Fuente: Elaboración propia.

En el nivel TRL 3, se concretó el diseño detallado del dispositivo, incluyendo la integración de sensores vestibles (wearables) para la adquisición continua y no invasiva de señales fisiológicas. El sistema se fundamentó en un microcontrolador ESP32, debido a sus capacidades de procesamiento y conectividad inalámbrica mediante Bluetooth LE (ver Tabla 2 para detalles de selección de componentes).

Tabla 2. Componentes del dispositivo IoT.

Componente	Razón de elección principal
Microcontrolador ESP32	Conectividad Bluetooth integrada, bajo consumo, costo reducido
MAX30102	Alta precisión en medición de FC y oxigenación, bajo consumo energético
Batería LiPo 3.7 V	Tamaño reducido, duración adecuada para pruebas piloto

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se desarrolló una aplicación móvil específica para la visualización y monitoreo en tiempo real de los datos adquiridos, facilitando la interacción y la interpretación clínica por parte del personal médico.

Diseño de la arquitectura

La arquitectura propuesta se basó en la conexión al microcontrolador los sensores, así como la comunicación con la aplicación móvil. Los sensores seleccionados, en particular el MAX30102 para la medición de frecuencia cardíaca y oxigenación, transmiten datos en tiempo real al microcontrolador mediante protocolos inalámbricos.

El microcontrolador procesa y envía la información de manera continua a una aplicación móvil diseñada específicamente para mostrar gráficamente la información fisiológica capturada.

El dispositivo se empareja con la aplicación móvil mediante Bluetooth Low Energy presionando el botón físico de sincronización, estableciendo un enlace cifrado de baja latencia que permite la transmisión continua de datos fisiológicos.

Esta aplicación permite además almacenar los datos recopilados para análisis posteriores, facilitando el monitoreo prolongado del dolor en niños en condiciones naturales y clínicas.

La Figura 1, muestra el diagrama esquemático del dispositivo IoT.

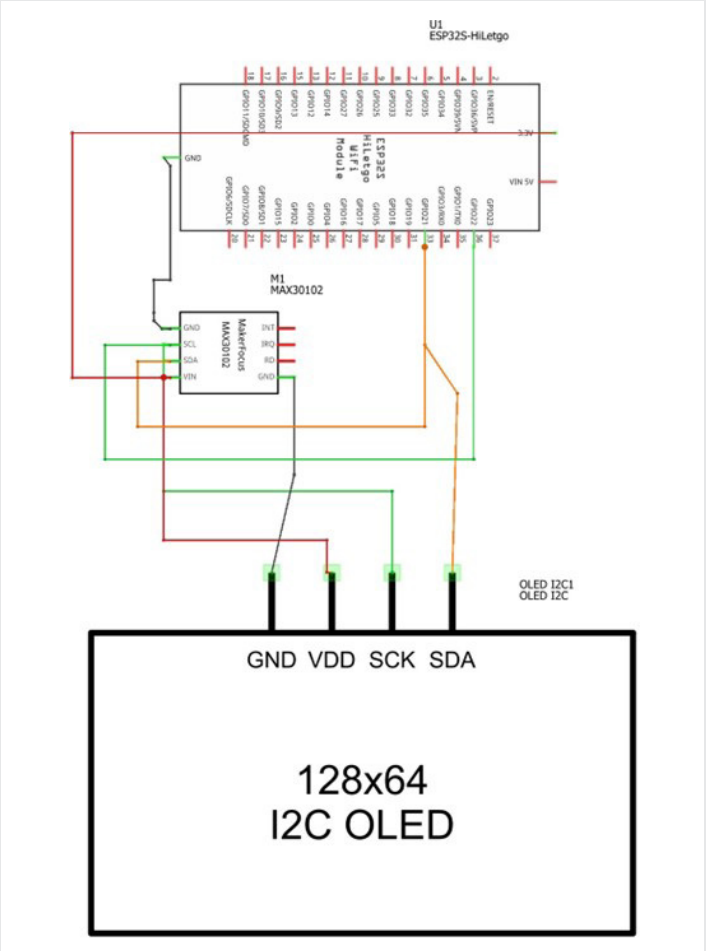


Figura 1: Diagrama esquemático del dispositivo IoT.
Fuente: Elaboración propia.

Escenario de prueba

Para garantizar la seguridad de los participantes pediátricos y evitar la inducción de dolor real, todas las pruebas se llevaron a cabo bajo condiciones totalmente simuladas. En primer lugar, se generaron señales fisiológicas sintéticas de frecuencia cardíaca (FC) y saturación de oxígeno (SpO_2) ajustando los rangos de salida del sensor de pulso-oxímetro integrado. Con base en umbrales reportados en la literatura [19], se definieron los valores de referencia para el dolor pediátrico.

Finalmente, para verificar el comportamiento del sistema ante situaciones extremas, se inyectaron manualmente valores fuera de umbral, definidos como frecuencia cardiaca mayor a 160 lpm y SpO_2 por debajo de 85 %, en el dataset sintético. Esta estrategia permitió confirmar que el componente de clasificación identificara correctamente estos casos como "peligro inmediato", garantizando así una evaluación exhaustiva de los límites de operación del dispositivo.

RESULTADOS

La implementación del dispositivo IoT propuesto para el monitoreo del dolor en niños proporcionó resultados prometedores durante las pruebas iniciales. A continuación, se presentan los hallazgos principales derivados del montaje y funcionamiento del prototipo, así como las pruebas internas realizadas para verificar la precisión en la adquisición de señales fisiológicas.

Integración y funcionamiento del dispositivo

El dispositivo IoT desarrollado fue montado exitosamente utilizando el microcontrolador ESP32, el sensor MAX30102 para mediciones fisiológicas y una pantalla OLED para visualización en tiempo real Figura 2. La integración física entre estos componentes permitió una captura efectiva y continua de las variables fisiológicas mencionadas.

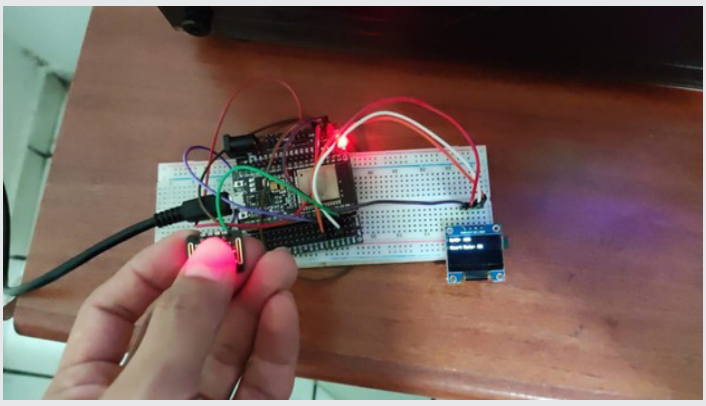


Figura 2. Montaje del dispositivo IoT sobre protoboard.
Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se desarrolló una aplicación móvil utilizando la plataforma Flutter, que facilitó la comunicación Bluetooth con el dispositivo. La interfaz de la aplicación mostró efectivamente la información recibida, incluyendo el ritmo cardíaco (BPM) y la saturación de oxígeno en sangre (SpO2), lo que validó la capacidad del sistema para transmitir datos en tiempo real Figura 3.

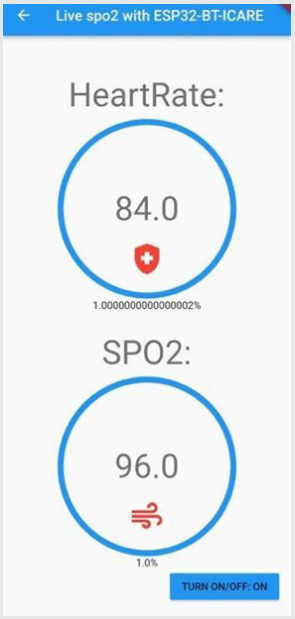


Figura 3. Aplicación móvil de monitoreo de las variables fisiológicas.
Fuente: Elaboración propia.

Validación interna del dispositivo

Con el objetivo de verificar la precisión en la captura y transmisión de datos del dispositivo, se realizaron diversas pruebas internas con el conjunto de datos mencionado previamente.

Las pruebas simuladas se realizaron durante sesiones de observación continua de 5 a 10 minutos por escenario, lo que permitió verificar la estabilidad del sistema en la adquisición de señales. La calibración del dispositivo se limitó a los parámetros de fábrica del sensor MAX30102, sin ajustes adicionales en esta fase. Los datos se transmitieron desde el ESP32 hacia la aplicación móvil mediante Bluetooth Low Energy con una frecuencia promedio de 1 Hz (una muestra por segundo). Se reconoce que la colocación del sensor en distintas posiciones del dedo puede introducir sesgos o artefactos en las lecturas, lo cual constituye una limitación del prototipo. Finalmente, en esta fase los umbrales clínicos de dolor no fueron programados; únicamente se utilizaron como referencia los rangos de frecuencia cardíaca y SpO_2 reportados en la literatura para comprobar la capacidad del sistema de detectar estados fisiológicos extremos

Los resultados obtenidos demostraron coherencia interna y precisión en la medición de variables fisiológicas, tal como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de pruebas internas del dispositivo IoT.

ID	Ritmo cardíaco (BPM)	SpO2 (%)	Estado
1	86	97	Reposo
2	102	96	Activo
3	84	96	Reposo
4	99	97	Reposo
5	87	98	Activo
6	92	96	Reposo
7	100	99	Activo
8	95	98	Reposo
9	104	95	Activo
10	80	100	Reposo

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3 se observa que, en estado de reposo (n= 6), la frecuencia cardíaca promedió 89.3 BPM (rango 80–99) y la SpO_2 97.3 % (rango 96–100), mientras que en estado activo (n= 4) la frecuencia cardíaca aumentó a un promedio de 98.3 BPM (rango 87–104) y la SpO_2 se mantuvo estable en 97.0 % (rango 95–99). Esta diferenciación clara entre reposo y actividad, con variaciones esperadas en la frecuencia cardíaca y mínimos cambios en la saturación de oxígeno, respalda la capacidad del dispositivo para capturar y transmitir datos coherentes y precisos en distintos niveles de demanda fisiológica.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio indican que el dispositivo IoT propuesto es técnicamente viable para la monitorización continua y objetiva de variables fisiológicas relacionadas con la respuesta al dolor en niños, específicamente mediante la medición de la frecuencia cardíaca y la saturación de oxígeno en sangre (SpO2). Estos hallazgos iniciales son congruentes con investigaciones previas que resaltan la utilidad potencial de tecnologías IoT y sensores vestibles para mejorar la precisión en la evaluación del dolor pediátrico.

La integración exitosa del microcontrolador ESP32 con el sensor MAX30102 y la comunicación eficiente mediante Bluetooth LE con la aplicación móvil desarrollada, demuestra que la adquisición remota de datos fisiológicos puede realizarse de manera efectiva en tiempo real, superando limitaciones de métodos tradicionales que usualmente requieren evaluaciones puntuales en contextos clínicos específicos. Este aspecto es fundamental considerando la dificultad inherente en la evaluación subjetiva del dolor infantil, particularmente en pacientes preverbales o con discapacidades cognitivas o comunicativas.

Sin embargo, es importante señalar ciertas limitaciones del presente desarrollo. Aunque las pruebas internas demostraron una buena precisión y coherencia en la adquisición de datos, estas fueron realizadas bajo condiciones controladas y simuladas, lo que indica la necesidad de estudios adicionales en entornos clínicos reales para validar completamente la eficacia del dispositivo. Además, el dispositivo desarrollado en esta fase no alcanza todavía la precisión de dispositivos clínicos certificados, siendo necesarias posteriores iteraciones tecnológicas y metodológicas para alcanzar estándares médicos.

La norma ISO 80601-2-61 para oxímetros de pulso clínicos establece un error raíz cuadrático medio (Arms) de $SpO_2 \leq 2$ % (rango 70–100 %) y una precisión de frecuencia cardíaca de ± 3 lpm como requisitos para certificación. Dado que nuestros datos (Tabla 3) provienen únicamente de las lecturas operativas del dispositivo IoT y no contamos con mediciones simultáneas frente a un monitor de referencia certificado, no es posible calcular de manera fiable ni el Arms de SpO_2 ni el error medio absoluto en frecuencia cardíaca. Esta limitación metodológica, derivada de la ausencia de pruebas con usuarios pediátricos y la imposibilidad de inducir dolor para validación clínica, se abordará en trabajos futuros mediante un estudio comparativo con equipos de referencia bajo condiciones controladas.

Adicionalmente, el presente estudio exploró variables limitadas como la frecuencia cardíaca y SpO2, reconociendo que otros biomarcadores, como la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC) y la Actividad Electrodérmica (AED), podrían ofrecer mayor especificidad para la evaluación objetiva del dolor, tal como ha sido sugerido por la literatura reciente. La inclusión de estos parámetros en futuras versiones del dispositivo podría mejorar sustancialmente su valor clínico.

Otro punto crítico para el desarrollo futuro del dispositivo es la incorporación de técnicas avanzadas de procesamiento de datos como Machine Learning. La aplicación de algoritmos que permitan identificar patrones específicos en las señales fisiológicas podría mejorar significativamente la interpretación clínica de los datos recolectados, incrementando la capacidad del sistema para discriminar entre respuestas fisiológicas específicas asociadas al dolor y otras situaciones emocionales o de estrés generalizado.

El alcance de este prototipo corresponde a la validación funcional del sensado y la transmisión inalámbrica de variables fisiológicas en población pediátrica bajo condiciones simuladas. Si bien la literatura reporta umbrales de frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno asociados a estados de dolor, en esta fase dichos valores se emplearon únicamente como referencia para pruebas internas y no se implementaron reglas clínicas de decisión. Por lo tanto, el dispositivo distingue únicamente entre estados fisiológicos básicos de reposo y actividad, sin inferir directamente niveles de dolor. La definición de umbrales clínicos validados y el desarrollo de algoritmos para correlacionarlos con la experiencia de dolor constituyen la siguiente etapa de investigación.

Finalmente, desde un punto de vista práctico y de

usabilidad, será fundamental avanzar hacia la miniaturización del dispositivo, optimizar la interfaz de usuario para facilitar su interpretación por personal clínico y asegurar la comodidad y portabilidad en su uso pediátrico. Estos aspectos prácticos pueden influir notablemente en la aceptación clínica y la implementación efectiva del sistema.

Aunque se encuentran aún en fases iniciales, los resultados respaldan el potencial del dispositivo propuesto como herramienta complementaria para la evaluación objetiva del dolor infantil, estableciendo claramente las bases para futuras investigaciones tecnológicas y clínicas que permitan validar plenamente su utilidad en contextos reales.

CONCLUSIONES

El desarrollo del dispositivo IoT para el monitoreo del dolor infantil mediante variables fisiológicas mostró resultados prometedores en términos de viabilidad técnica y funcionalidad práctica. La integración efectiva del sensor MAX30102 y el microcontrolador ESP32, junto con la aplicación móvil desarrollada, permitió una adquisición y visualización confiable de datos como la saturación de oxígeno (SpO2) y el ritmo cardíaco, fundamentales para evaluar respuestas fisiológicas asociadas al dolor.

Las pruebas internas realizadas, en condiciones simuladas, permitieron validar de manera inicial la estabilidad del prototipo en la adquisición de variables fisiológicas, sin que se hayan realizado comparaciones directas con dispositivos comerciales en esta fase. La evaluación de medidas de efectividad frente a equipos de referencia clínicos y comerciales constituye parte de las etapas futuras del proyecto. En este sentido, estudios previos de nuestro grupo de investigación [20], [21], han demostrado la viabilidad de sistemas IoT e IoMT en validaciones con equipos comerciales, lo cual sustenta la pertinencia de avanzar hacia dichas pruebas en el contexto pediátrico. Este resultado refuerza la potencial utilidad clínica del dispositivo, aunque se reconoce la necesidad imperativa de realizar pruebas adicionales en entornos clínicos reales para consolidar su efectividad y precisión.

La investigación destacó también limitaciones inherentes al prototipo actual, especialmente relacionadas con la necesidad de expandir la gama de parámetros fisiológicos monitoreados, considerados como marcadores más específicos para la evaluación del dolor. Además, es clave la integración futura de técnicas avanzadas de análisis inteligente para aumentar la capacidad diagnóstica y predictiva del sistema.

Este trabajo identificó claras direcciones para futuras investigaciones, incluyendo la optimización de la interfaz de usuario, la miniaturización y portabilidad del dispositivo, así como la obtención de aprobaciones médicas y normativas necesarias para su uso clínico extendido. Estas mejoras serán fundamentales para garantizar la aceptación y uso efectivo del dispositivo en contextos clínicos pediátricos, contribuyendo sustancialmente a la calidad de vida y atención médica de niños con dificultades comunicativas o condiciones especiales que dificultan la evaluación tradicional del dolor.

Finalmente, este proyecto establece una base para el desarrollo de tecnologías IoT especializadas en pediatría, con potencial significativo para mejorar la evaluación objetiva del dolor y la calidad de la atención médica pediátrica.

BIBLIOGRAFÍA

[1] R.-D. Treede et al., «Chronic pain as a symptom or a disease: the IASP Classification of Chronic Pain for the International Classification of Diseases (ICD-11)», Pain, vol. 160, n.o 1, pp. 19-27, ene. 2019, doi: 10.1097/j.pain.0000000000001384.

[2] E. Johnson, K. Van Zijl, y A. Kuyler, «Pain communication in children with autism spectrum disorder: A scoping review», Paediatric and Neonatal Pain, vol. 5, n.o 4, pp. 127-141, dic. 2023, doi: 10.1002/pne2.12115.

[3] T. Hechler et al., «Systematic Review on Intensive Interdisciplinary Pain Treatment of Children With Chronic Pain», Pediatrics, vol. 136, n.o 1, pp. 115-127, jul. 2015, doi: 10.1542/peds.2014-3319.

[4] J. D. H. P. Simon et al., «Pain monitoring app leads to less pain in children with cancer at home: Results of a randomized controlled trial», Cancer, vol. 130, n.o 13, pp. 2339-2350, jul. 2024, doi: 10.1002/cncr.35100.

[5] C. Gallego Muñoz, M. J. Martínez Bautista, N. Guerrero Navarro, I. Romero Hernández, F. García Martín, y M. V. Manzano Martín, «Manejo del dolor en el paciente oncológico pediátrico y factores que influyen en su percepción», Revista Cubana de Farmacia, vol. 49, n.o 2, pp. 394-411, 2015.

[6] N. Ahmad, R. P. George, y R. Jahan, «Emerging trends in IoT for categorized health care», en 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), Kannur, Kerala, India: IEEE, jul. 2019, pp. 1438-1441. doi: 10.1109/ICICICT46008.2019.8993208.

[7] O. Al-Mahmud, K. Khan, R. Roy, y F. Mashuque Alamgir, «Internet of Things (IoT) Based Smart Health Care Medical Box for Elderly People», en 2020 International Conference for Emerging Technology (INCET), Belgaum, India: IEEE, jun. 2020,

pp. 1-6. doi: 10.1109/INCET49848.2020.9153994.

[8] M. F. Khan et al., «An IoMT-Enabled Smart Healthcare Model to Monitor Elderly People Using Machine Learning Technique», Computational Intelligence and Neuroscience, vol. 2021, n.o 1, p. 2487759, ene. 2021, doi: 10.1155/2021/2487759.

[9] L. A. Durán-Vega et al., «An IoT System for Remote Health Monitoring in Elderly Adults through a Wearable Device and Mobile Application», Geriatrics, vol. 4, n.o 2, p. 34, may. 2019, doi: 10.3390/geriatrics4020034.

[10] S. Mencía, C. Alonso, C. Pallás-Alonso, J. López-Herce, y Maternal and Child Health and Development Network II (SAMID II), «Evaluation and Treatment of Pain in Fetuses, Neonates and Children», Children, vol. 9, n.o 11, p. 1688, nov. 2022, doi: 10.3390/children9111688.

[11] J. E. Beyer y N. Wells, «The Assessment of Pain in Children», Pediatric Clinics of North America, vol. 36, n.o 4, pp. 837-854, ago. 1989, doi: 10.1016/S0031-3955(16)36724-4.

[12] L. Becerra et al., «Intrinsic brain networks normalize with treatment in pediatric complex regional pain syndrome», NeuroImage: Clinical, vol. 6, pp. 347-369, 2014, doi: 10.1016/j.nicl.2014.07.012.

[13] M. A. Fortier, W. W. Chung, A. Martinez, S. Gago-Masague, y L. Sender, «Pain buddy: A novel use of m-health in the management of children's cancer pain», Computers in Biology and Medicine, vol. 76, pp. 202-214, sep. 2016, doi: 10.1016/j.compbiomed.2016.07.012.

[14] C. Merino Bonilla, «Valoración del dolor en pediatría: validez de las escalas del dolor», Grado de Enfermería, Universitat de les Illes Balears, 2019. [En línea]. Disponible en: https://dspace.uib.es/xmlui/bitstream/handle/11201/150314/Merino_Bonilla_Cristina_150314.pdf.

[15] F. Reinoso-Barbero, A. I. Lahoz Ramón, M. P. Durán Fuente, G. Campo García, y L. E. Castro Parga, «Escala LLANTO: instrumento español de medición del dolor agudo en la edad preescolar», Anales de Pediatría, vol. 74, n.o 1, pp. 10-14, ene. 2011, doi: 10.1016/j.anpedi.2010.08.005.

[16]P. C. Santana-Mancilla, L. E. Anido-Rifón, J. Contreras-Castillo, y R. Buenrostro-Mariscal, «Heuristic Evaluation of an IoMT System for Remote Health Monitoring in Senior Care», IJERPH, vol. 17, n.o 5, p. 1586, mar. 2020, doi: 10.3390/ijerph17051586.

[17] B. N. Rosenbloom et al., «Prognostic factors».

of chronic postsurgical pain in children and adolescents: a systematic review and meta-analysis», Reg Anesth Pain Med, vol. 50, n.o 2, pp. 144-152, feb. 2025, doi: 10.1136/rapm-2024-105696.

[18] B. Stevens, C. Johnston, P. Petryshen, y A. Taddio, «Premature Infant Pain Profile: Development and Initial Validation»:, The Clinical Journal of Pain, vol. 12, n.o 1, pp. 13-22, mar. 1996, doi: 10.1097/00002508-199603000-00004.

[19] D. Jaramillo-Quintanar, I. A. Cruz-Albarran, V. M. Guzman-Sandoval, y L. A. Morales-Hernandez, «Smart Sensor Based on Biofeedback to Measure Child Relaxation in Out-of-Home Care», Sensors, vol. 20, n.o 15, p. 4194, jul. 2020, doi: 10.3390/s20154194.

[20] V. M. Guzman-Sandoval, L. S. Gaytan-Lugo, y P. C. Santana-Mancilla, «i-Care: an IoMT Remote Monitoring System Of Physiological Pain in Pediatric Patients», en 2021 Mexican International Conference on Computer Science (ENC), Morelia, Mexico: IEEE, ago. 2021, pp. 1-4. doi: 10.1109/ENC53357.2021.9534829.

Ciencias de la Computación

Ingeniantes

Automatización de mediciones para la obtención de diagramas de Bode con control simultáneo de instrumentos mediante MATLAB

RESUMEN: Este trabajo presenta un sistema automatizado de medición implementado en MATLAB, que permite el control simultáneo de un generador de funciones y un osciloscopio mediante comandos SCPI, utilizando comunicación a través de los protocolos GPIB y USB. El objetivo principal es automatizar la obtención de diagramas de Bode, minimizando el esfuerzo manual y mejorando la repetibilidad. El sistema ejecuta barridos de frecuencia configurables desde 10 Hz hasta 100 MHz, registra automáticamente las mediciones de magnitud y fase de la señal de prueba, genera las gráficas correspondientes en tiempo real. Como caso de validación, se empleó un filtro pasa-bajas RC de primer orden, permitiendo verificar la coherencia de los resultados con el modelo teórico. Esta herramienta reduce el error humano, optimiza el tiempo de adquisición de datos y ofrece una alternativa eficaz para la caracterización práctica de circuitos electrónicos en entornos académicos o de laboratorio.

PALABRAS CLAVE: automatización, diagrama de Bode, caracterización de sistemas, GPIB, MATLAB.

Colaboración
Willy Omar Torres Melchor; Ramón Chávez Bracamontes;Julio Isaac Flores Figueroa; Jaime Jalomo Cuevas, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán

Fecha de recepción: 25 de agosto de 2025
Fecha de aceptación: 10 de noviembre de 2025

ABSTRACT: This work presents an automated measurement system implemented in MATLAB, which enables the simultaneous control of a function generator and an oscilloscope using SCPI commands and communication via GPIB and USB protocols. The main objective is to automate the acquisition of Bode plots, reducing manual effort and improving repeatability. The system performs configurable frequency sweeps from 10 Hz to 100 MHz, automatically records magnitude and phase measurements of the test signal, and generates real-time plots. As a validation case, a first-order RC low- pass filter was used to confirm the accuracy of the results compared to the theoretical model. This tool minimizes human error, reduces measurement time, and provides an efficient solution for practical characterization of electronic circuits in academic or laboratory environments.

KEYWORDS: automation, Bode diagram, characterization of systems, GPIB, MATLAB.

INTRODUCCIÓN

En los laboratorios de caracterización y pruebas electrónicas es común la necesidad de automatizar mediciones utilizando diversos instrumentos, como generadores de funciones, fuentes de alimentación, multímetros u osciloscopios. La automatización permite realizar análisis con mayor exactitud y agilidad.

En los últimos años, la instrumentación virtual ha cobrado relevancia como una solución eficaz para optimizar procesos de medición [1]. Por ejemplo, en [2] se implementó un sistema de análisis de impedancia basado en software para sensores QCM, demostrando la capacidad de los entornos virtuales para obtener datos precisos en tiempo real.

Aunque la automatización de instrumentos se remonta a décadas atrás [3], actualmente está impulsada por estándares modernos como SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments), cuyos beneficios han sido plenamente adoptados en la última década. El uso de estos comandos se ha consolidado como estándar en la automatización de sistemas de medición, facilitando la interoperabilidad entre instrumentos de distintos fabricantes y reduciendo la dependencia de control manual. En [4] se demostró que el uso de SCPI sobre interfaces como GPIB, USB o LAN permite implementar arquitecturas de control robustas y repetibles en entornos industriales complejos, donde la ejecución manual de pruebas es inviable.

En este contexto, la obtención manual de diagramas de Bode representa un proceso lento, laborioso y susceptible a errores, ya que implica ajustar frecuencias en el generador, capturar los valores de entrada y salida desde el osciloscopio para cada punto, anotar los datos y procesarlos posteriormente en una hoja de cálculo o software auxiliar, lo que conlleva una considerable inversión de tiempo y limita la repetibilidad del procedimiento. En respuesta a esta problemática, se desarrolló una herramienta que automatiza el barrido de frecuencias, registra de manera continua las mediciones de magnitud y fase, y genera gráficas en tiempo real, permitiendo un análisis más preciso, repetible, eficiente y considerablemente más ágil de los datos obtenidos.

El objetivo de este trabajo es desarrollar e implementar un sistema de medición automatizado mediante MATLAB, que controle simultáneamente un generador de funciones y un osciloscopio, para generar diagramas de Bode sin intervención manual. Como beneficio cuantificable, la herramienta reduce el tiempo total de caracterización en más de un 90 % respecto al procedimiento manual, con mayor precisión y repetibilidad en las pruebas.

A diferencia de trabajos previos centrados exclusivamente en simulaciones o instrumentación virtual, el sistema propuesto integra control simultáneo de múltiples instrumentos físicos, adquisición real de datos y graficación automatizada en tiempo real, lo cual permite replicabilidad inmediata en entornos de laboratorio educativo.

En consecuencia, se plantea la siguiente hipótesis

La implementación de un sistema automatizado de medición, que controle instrumentos mediante MATLAB y protocolos GPIB/USB, permitirá obtener diagramas de Bode de manera más eficiente, precisa y repetible en comparación con el procedimiento manual tradicional.

MATERIAL Y MÉTODOS

Una adecuada selección y configuración de los instrumentos de medición es fundamental para garantizar la fidelidad de los datos. En [5] se demostró que, en sistemas automatizados, una elección apropiada de generadores, osciloscopios y multímetros, junto con una calibración precisa, puede reducir significativamente el error sistemático, mejorando la confiabilidad en mediciones de magnitud y fase. De acuerdo con la documentación oficial de MathWorks [6], la interfaz GPIB permite conectar instrumentos de prueba directamente a MATLAB, facilitando el envío de comandos y la adquisición de datos.

En esta sección se describe detalladamente el procedimiento seguido para la automatización de mediciones utilizando MATLAB, el protocolo GPIB, y los instrumentos empleados. Se explican las conexiones físicas, la configuración del entorno de trabajo y el desarrollo del código encargado de realizar el barrido de frecuencia, la adquisición de datos y finalmente sus gráficas.

Conexión de instrumentos y arquitectura del sistema

Para establecer comunicación entre la computadora y los equipos de medición, se utilizó el siguiente arreglo:

El generador de funciones Tektronix AFG3251

[7] fue uno de los instrumentos principales en este sistema. Este equipo permite generar señales senoidales de frecuencia y amplitud controladas mediante comandos SCPI. El instrumento se ilustra en la Figura 1.

Figura 1. Generador de señales Tektronix AFG3251.
Fuente: Recuperada de https://www.axiomtest.com/Signal-Generators/ARB,-Data,-Function,-Pattern-and-Pulse/Tektronix/AFG3251/Arbitrary-..-Function-Generator,-240-MHz,-1-Ch./

Para controlar este generador desde la computadora, se utilizó un adaptador USB- GPIB Keysight 82357B [8], el cual permite la transmisión de comandos SCPI bajo el estándar IEEE 488.2. Este se puede observar en la Figura 2.

Figura 2. Adaptador USB-GPIB Keysight 82357B.
Fuente: recuperada de https://www.keysight.com/us/en/product/82357B/usb-gpib-interface-high-speed-usb-2-0.html.

El segundo instrumento utilizado fue el osciloscopio Agilent TECHNOLOGIES DSO7034A [9], el cual se conectó directamente a la computadora mediante un cable USB tipo B. Este instrumento se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Osciloscopio Agilent TECHNOLOGIES DSO7034A.
Fuente: recuperada de https://www.keysight.com/us/en/product/DSO7034A/oscilloscope-350-mhz-4-analog-channels.html.

Finalmente, el esquema de conexión completa del sistema se muestra en la Figura 4. En él se puede observar cómo se conectan entre sí los instrumentos, el circuito bajo prueba y la computadora.

Configuración del entorno de trabajo

Según [10], para comenzar a trabajar con GPIB en MATLAB, es necesario identificar los dispositivos VISA conectados y establecer la comunicación mediante objetos de interfaz.

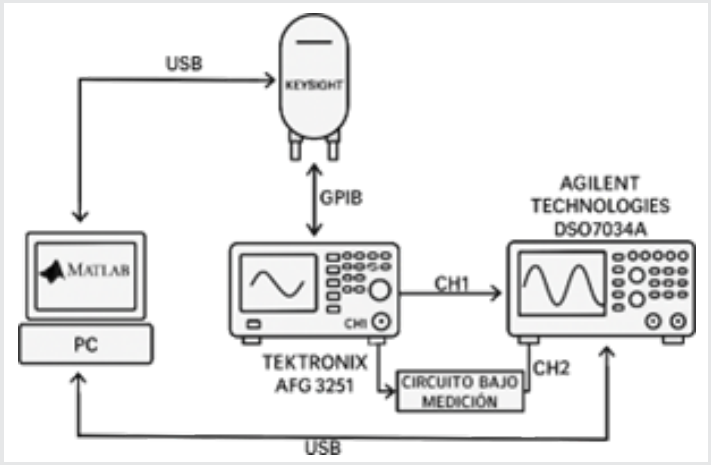


Figura 4. Diagrama general de conexión del sistema de medición.
Fuente: Elaboración propia.

Para lograr la comunicación entre MATLAB y los instrumentos se deben realizar los siguientes pasos.

Instalación de Keysight IO Libraries Suite

Se instaló el software IO Libraries Suite de Keysight, el cual permite reconocer automáticamente los instrumentos conectados vía USB y GPIB. Este software proporciona una interfaz gráfica donde se listan todos los dispositivos disponibles a través del estándar VISA [11], indicando su dirección, protocolo y estado de conexión, similar a las soluciones propuestas por National Instruments en su guía de automatización con NI-VISA [12]. Aunque en este trabajo se utilizó MATLAB, también existen alternativas como PyVISA [13], que permiten la comunicación con instrumentos mediante Python.

Tal como se muestra en la Figura 5, ambos instrumentos fueron detectados correctamente y se encuentran listos para su control desde MATLAB.

Reconocimiento de instrumentos en MATLAB

En caso de que algún dispositivo no sea detectado, se recomienda consultar [14], la instalación de drivers VISA y el estado del adaptador GPIB mediante la herramienta de diagnóstico del IO Libraries Suite [11].

Una vez que los instrumentos fueron detectados en IO Libraries Suite, se procedió a establecer la comunicación desde MATLAB utilizando los siguientes comandos:

Para el osciloscopio Agilent DSO7034A, que se comunica por USB:

```
obj1 = visa('agilent', 'US-
B0::2391::5941::MY48260514::0::INSTR');
fopen(obj1);
```

Para el generador de funciones Tektronix AFG3251, conectado mediante GPIB:

```
F1 = gpib('AGILENT', 7, 2); % Board index 7,
dirección GPIB 2 fopen(F1);
```

Figura 5. Detección de instrumentos en Keysight IO Libraries Suite.
Fuente: Recuperada de captura de pantalla del software Keysight IO Libraries Suite.

Estas instrucciones permitieron abrir los canales de comunicación desde MATLAB hacia cada instrumento.

Parámetros de prueba y funcionamiento del código

El sistema automatizado de medición está basado en un barrido de frecuencia configurable, durante el cual se miden automáticamente la magnitud y fase entre las señales de entrada y salida del circuito bajo prueba. A continuación, se describen los parámetros definidos al inicio del código y su función dentro del proceso.

Parámetros principales del barrido

En la Tabla 1 se observan los parámetros configurables del sistema, los cuales pueden ajustarse según los requerimientos del análisis del circuito.

Tabla 1. Parámetros configurables del sistema.

Parámetro	Descripción
fi	Frecuencia inicial del barrido (mínimo 10 Hz).
ff	Frecuencia final del barrido (máximo 100 MHz).
amp	Amplitud de la señal generada (valor pico en volts).
factor_paso	Factor que determina el paso dentro de cada década.

Fuente: Elaboración propia.

donde:
- fi y ff establecen los límites inferior y superior del barrido de frecuencia.
- amp define la amplitud de la señal senoidal generada. Este valor se puede modificar según la sensibilidad del circuito bajo prueba o la capacidad del osciloscopio.
- factor_paso determina cuántos puntos se medirán por cada década logarítmica.

Procedimiento para el barrido de frecuencias

El código realiza un ciclo que recorre el rango de frecuencias de forma logarítmica, evaluando la respuesta del circuito en cada punto. En cada iteración se llevan a cabo los pasos que se muestran a continuación, y que también se detallan en el diagrama mostrado en la Figura 6.

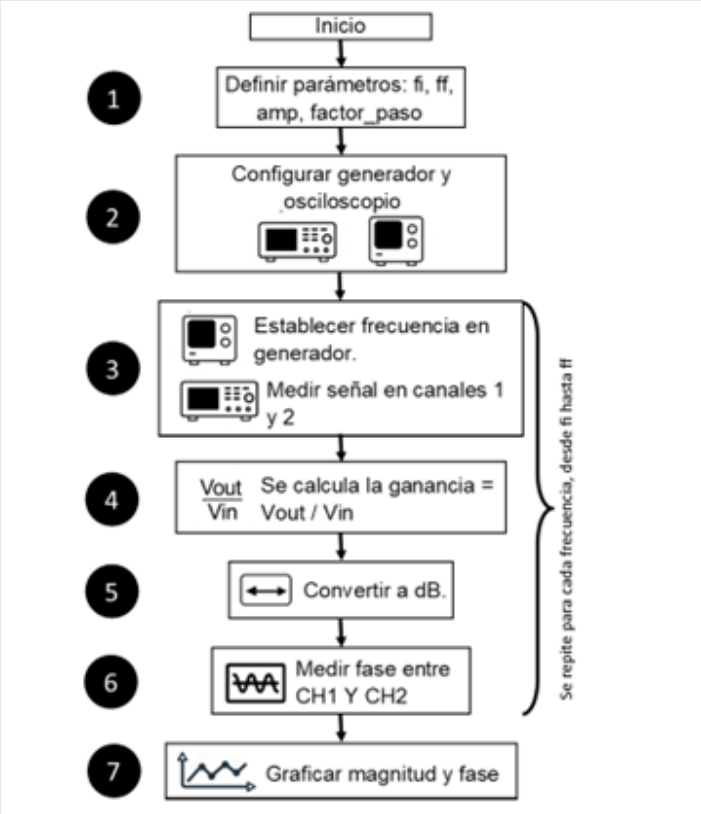


Figura 6. Ejemplo del ciclo de barrido de frecuencias
Fuente: Elaboración propia.

1. Se definen los parámetros de medición deseados para el análisis en el código de MATLAB.
2. Se envían los comandos SCPI al generador y al osciloscopio para establecer los nuevos parámetros.
3. Se mide la señal de salida (Vpp) en el canal 2 del osciloscopio.
4. Se calcula la ganancia como el cociente entre Vpp de salida y Vpp de entrada.
5. Se convierte la ganancia a decibeles (dB).
6. Se mide la fase entre las señales del canal 1 (entrada) y canal 2 (salida).
7. Los datos de frecuencia, magnitud y fase se almacenan en matrices para su posterior procesamiento y generación de las gráficas correspondientes.

El sistema fue programado en MATLAB utilizando estructuras de control como bucles for y funciones específicas para la comunicación con instrumentos (fopen, fprintf, query). Para cada frecuencia del barrido, se establece la señal de salida en el generador utilizando comandos SCPI. A continuación, se adquieren las señales de entrada y salida desde el osciloscopio, midiendo sus valores pico a pico (Vpp) por medio de funciones de consulta (query) a los canales CH1 y CH2.

La ganancia se calcula como el cociente entre Vout y Vin (Ecuación 1), y posteriormente se convierte a decibeles utilizando la fórmula que se presenta en la Ecuación 2.

$$Magnitud = \left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \quad \text{Ec. (1)}$$

$$G_{dB} = 20 \cdot log_{10}\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \quad \text{Ec. (2)}$$

La expresión presentada en la Ecuación 2 es una conversión general de ganancia a escala logarítmica y es válida para cualquier sistema lineal. Es importante no confundir esta fórmula con la pendiente del diagrama de Bode, que sí depende del orden del sistema: 20 dB/década para primer orden, 40 dB/década para segundo orden, y así sucesivamente.

La fase se determina con base en el retardo temporal entre las señales medidas, tomando en cuenta la configuración de escala temporal y el desfase entre los dos canales.

Visualización de resultados

Una vez completado el barrido de frecuencias, los datos almacenados en matrices son procesados para graficar la respuesta en frecuencia del circuito. Se generan dos diagramas de Bode: uno representa la magnitud como una relación directa entre Vout y Vin, y el otro la expresa en decibeles.

El diagrama de Bode es una herramienta esencial para analizar la respuesta en frecuencia de sistemas lineales, ya que permite visualizar de forma clara el comportamiento de magnitud y fase respecto a la frecuencia. Según [15], este tipo de representación facilita la evaluación de la estabilidad y el diseño de sistemas de control retroalimentados.

Las gráficas fueron construidas en MATLAB utilizando funciones como semilogx para el eje de frecuencia logarítmica, y subplot para organizar ambas curvas en una sola figura. Además, se añadieron elementos de formato como etiquetas de ejes (xlabel, ylabel), títulos y cuadrículas (grid on) para facilitar el análisis visual de los resultados.

Este paso final permite observar de forma inmediata el comportamiento del circuito bajo prueba a lo largo del rango de frecuencias definido por el usuario.

RESULTADOS

Para validar el funcionamiento del sistema automatizado, se utilizó un circuito pasa-bajas de primer orden, compuesto por una resistencia en serie de 1 kΩ y un capacitor de 1 ⊠F a tierra. Este arreglo, mostrado a continuación en la Figura 7, fue empleado como circuito bajo prueba durante el barrido de frecuencias.

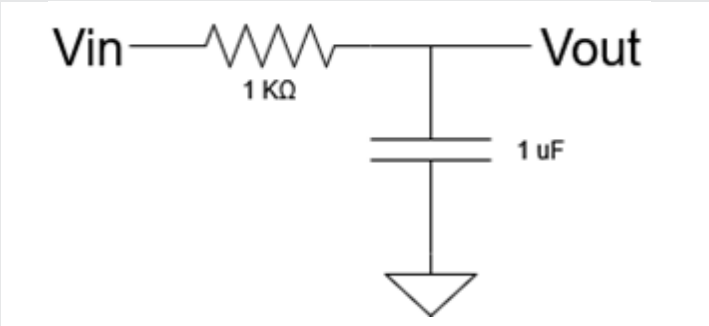


Figura 7. Arreglo del circuito pasa-bajas.
Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros establecidos para llevar a cabo el análisis en frecuencia se especifican en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores establecidos para el análisis en frecuencia.

Parámetro	Descripción
fi	10 Hz.
ff	1 kHz.
amp	1 V.
factor_paso	0.5 (Dos puntos por década)

Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 8 y 9 se muestran los diagramas de Bode obtenidos a partir del barrido de frecuencia. En la gráfica de la Figura 8, la ganancia se mantiene prácticamente constante en el rango de frecuencias bajas y comienza a disminuir de manera progresiva a partir de aproximadamente 50 Hz, alcanzando su frecuencia

de corte a los 159 Hz, y en la Figura 9, se observa un descenso progresivo en la fase conforme aumenta la frecuencia, alcanzando un desplazamiento cercano a 90° en frecuencias altas, lo cual coincide con el comportamiento característico de un filtro pasa-bajas de primer orden.

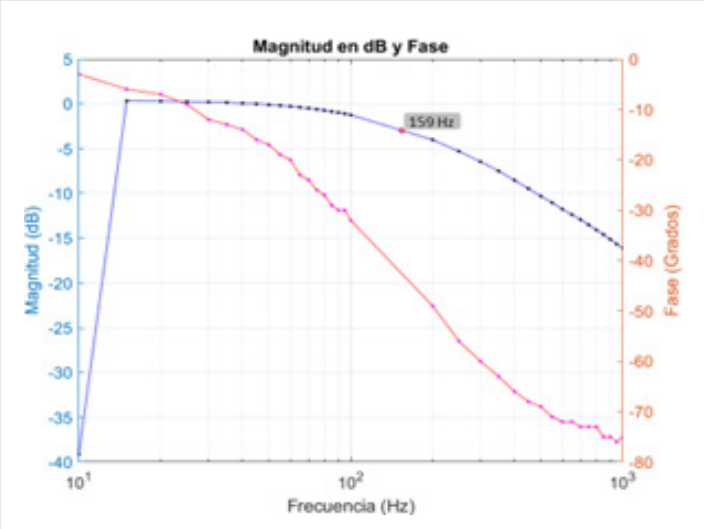


Figura 8. Diagrama de Bode: magnitud en decibeles
Fuente: Captura de pantalla en MATLAB.

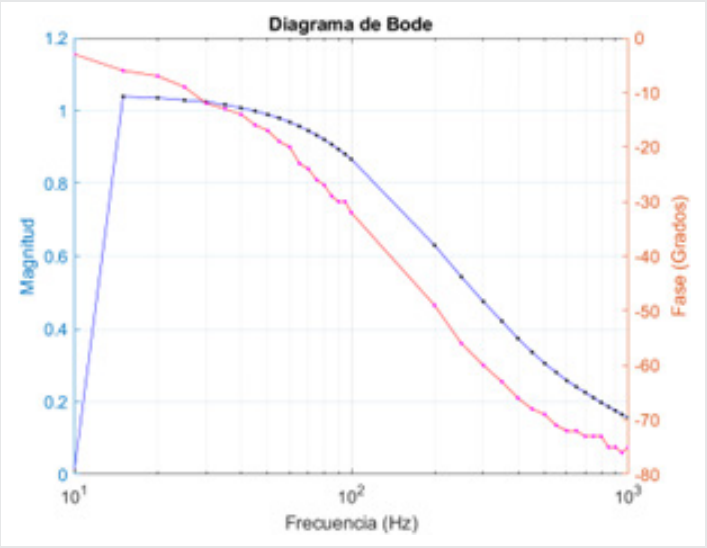


Figura 9. Diagrama de Bode: magnitud como ganancia directa (Vout/Vin).
Fuente: Captura de pantalla en MATLAB.

La frecuencia de corte está dada por la ecuación (3).

$$f_c = \left(\frac{1}{2\pi RC}\right) \quad \text{Ec. (3)}$$

Sustituyendo los valores utilizados en el experimento (R= 1kΩ, C= 1µF) se obtiene un valor teórico de 159.15 Hz, el cual se aproxima al resultado experimental observado mediante el sistema automatizado.

Para reforzar la validación de los resultados, se simuló el mismo circuito pasa-bajas en el software LTspice, utilizando los mismos valores de resistencia y capacitancia. Los resultados obtenidos en la simulación fueron comparados con las mediciones experimentales, mostrando un comportamiento consistente en términos de magnitud y fase.

Las Figuras 10 y 11 muestran la respuesta simulada del circuito en LTSpice, donde se confirma la frecuencia de corte teórica y la pendiente característica de atenuación, en concordancia con las mediciones realizadas por el sistema automatizado.

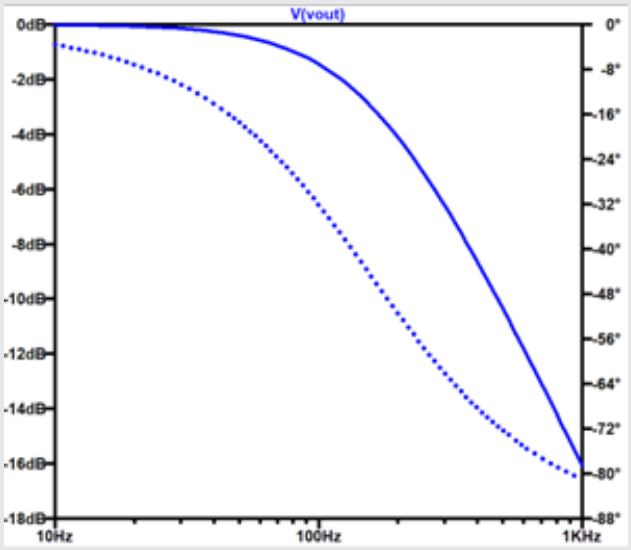


Figura 10. Gráfica de Simulación en LTSpice.
Fuente: Captura de pantalla en LTSpice.

Figura 11. Valores obtenidos en simulación. Fuente: Captura de pantalla en LTSpice.

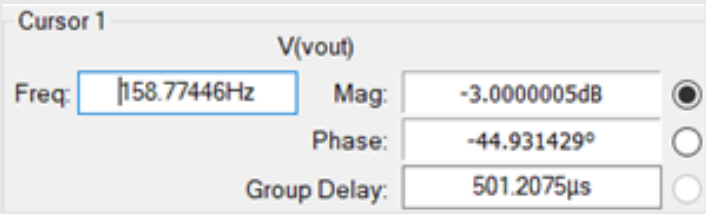


Figura 11. Valores obtenidos en simulación. Fuente: Captura de pantalla en LTSpice.

La siguiente tabla (Tabla 3) muestra una comparativa entre los resultados de cálculo teórico, simulado y experimental. (Los datos experimentales fueron estimados visualmente a partir de las gráficas obtenidas.)

Tabla 3. Comparativa de sistemas.

Concepto	Teórico	Simulación	Experim.
Frecuencia de corte	159.15 Hz	158.77 Hz	159 Hz
Ganancia	-16.06 dB	-16 dB	-16 dB

Fuente: Elaboración propia.

Para el barrido de frecuencias realizado en este experimento, el procedimiento manual implicaba aproximadamente 15 minutos, considerando el ajuste del generador, la captura de mediciones desde el osciloscopio y su anotación manual. A este tiempo se agregaban entre 5 y 10 minutos más para el procesamiento de los datos y la generación de los diagramas de magnitud y fase en una hoja de cálculo. En total, el proceso completo podía tomar entre 20 y 25 minutos por prueba. Con el sistema automatizado desarrollado, el mismo barrido se ejecuta en menos de un minuto, incluyendo la adquisición y graficación de los datos, lo que representa una reducción superior al 95% en el tiempo total de análisis. Esta optimización no solo permite realizar múltiples ensayos en menor tiempo, sino que también mejora la precisión y confiabilidad de los resultados.

RESULTADOS

Para validar el sistema automatizado, se eligió un circuito RC pasa-bajas de primer orden debido a su simplicidad y disponibilidad de componentes en el laboratorio escolar. Este tipo de circuitos son frecuentemente usados en cursos introductorios de electrónica y teoría de control. Esta elección permitió construir un caso práctico representativo, con materiales comunes y asequibles para los estudiantes.

Dado que, para este caso práctico, los valores del circuito ($R = 1\,k\Omega$, $C = 1\,\mu F$) generan una frecuencia de corte cercana a 159 Hz, se limitó el barrido experimental a un máximo de 1 kHz con el fin de observar con mayor resolución la transición en magnitud y fase, así como visualizar claramente el polo del sistema, característico de los filtros de primer orden. Esta decisión facilita el análisis y la validación del proceso automatizado de medición, especialmente en entornos educativos.

En filtros pasa-bajas de primer orden, una vez superada la frecuencia de corte, la magnitud de la respuesta disminuye a razón de 20 dB por década, acercándose asintóticamente a cero sin alcanzarlo completamente. La fase continúa descendiendo hasta aproximarse a −90° en frecuencias muy altas. Esta evolución, si bien no fue medida directamente, puede predecirse con alta precisión y se encuentra respaldada por las gráficas obtenidas dentro del rango evaluado.

Aunque la arquitectura del sistema permite operar hasta 100 MHz, este rango se reserva para futuros ensayos con circuitos que demanden análisis en bandas superiores. El sistema automatizado desarrollado es lo suficientemente versátil como para adaptarse al estudio de cualquier circuito eléctrico cuya respuesta en frecuencia se desee analizar, incluyendo configuraciones de segundo orden, redes resonantes o sistemas activos.

Las tolerancias de los componentes utilizados (1 kΩ ±5%, 1 F 10%) y el nivel de precisión del osciloscopio (<1%) permiten mantener los errores dentro de márgenes aceptables en contextos educativos y de laboratorio. Como trabajo futuro, se plantea extender la validación a circuitos más complejos, analizar un rango de frecuencias más amplio y formalizar el tratamiento de la incertidumbre mediante herramientas estadísticas.

Los resultados obtenidos mediante el sistema automatizado muestran una buena correspondencia con el comportamiento teórico esperado para un filtro pasa-bajas de primer orden. La frecuencia de corte determinada experimentalmente se aproxima al valor calculado mediante la ecuación teórica, y tanto la magnitud como la fase presentan una respuesta típica de este tipo de circuito.

En comparación con la simulación realizada en LTSpice, las curvas generadas por el sistema en MATLAB presentan una forma similar, especialmente en lo que respecta al punto de transición y la pendiente de atenuación.

Cabe destacar que las ligeras diferencias observadas entre los resultados de la simulación y los experimentales se deben a la presencia de factores físicos que no siempre se modelan con exactitud. Entre ellos se encuentran las capacitancias parásitas, la tolerancia de los componentes electrónicos y otros efectos del entorno que pueden alterar levemente las mediciones reales.

En comparación con los sistemas previos, como el de [16], que integraba MATLAB y GPIB para diagramas de Bode, el presente trabajo ofrece una solución más robusta al consolidar en un solo entorno la adquisición, el procesamiento y la visualización gráfica de magnitud y fase, con mínima intervención manual.

Este tipo de integración ha sido explorado en trabajos recientes como el de [17], quien automatizó la adquisición de diagramas de Bode utilizando MATLAB y equipos físicos mediante comandos SCPI. Sin embargo, su implementación se centró en tareas de adquisición secuencial sin incluir herramientas de visualización en tiempo real ni una interfaz adaptable por parte del usuario. En contraste, el sistema propuesto en este trabajo integra adquisición, procesamiento y graficación simultánea en un entorno único, lo que incrementa su utilidad tanto para la caracterización como para fines didácticos.

Tabla 4. Comparativa de sistemas.

Atributo	Singh et al.	BodePlotA	Este trabajo
Control de instrumentos físicos.	Si	No	Si
Plataforma usada	MATLAB + GPIB	MATLAB (teórico)	MATLAB + SCPI
Visualización en tiempo real	Limitada	Si simulada	Si (real)
Automatización sin intervención manual	Parcial	N/A	Completa
Enfoque educativo y replicabilidad	No explícito	Limitado	Alto

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con [18], los sistemas de medición electrónica deben ser flexibles y adaptables, permitiendo su aplicación tanto en entornos educativos como industriales.

Aunque el sistema aún no ha sido implementado formalmente en una asignatura, el prototipo fue presentado a estudiantes de nivel ingeniería en el Tecnológico Nacional de México, campus Ciudad Guzmán, como parte de una sesión demostrativa (Figura 12). Esta experiencia permitió observar un mayor interés y una mejor comprensión de conceptos clave como la frecuencia de corte, el comportamiento de filtros, la respuesta en frecuencia y la interpretación de diagramas de Bode. La posibilidad de visualizar resultados en tiempo real, sin recurrir a procedimientos manuales tediosos, convierte a esta herramienta en un recurso valioso para complementar la teoría de control con experiencias prácticas tangibles. Con el objetivo de fomentar la replicabilidad y el uso didáctico de esta herramienta, el código fuente completo del sistema automatizado, así como las instrucciones básicas para su configuración, han sido publicados en un repositorio en línea [19]. Esto permite a otros docentes, investigadores o estudiantes implementar la solución en sus propios laboratorios sin depender de licencias adicionales ni configuraciones complejas. El acceso al repositorio se encuentra detallado en la sección de referencias.

Figura 12. Sesión demostrativa del sistema automatizado con estudiantes de ingeniería en el TecNM, campus Ciudad Guzmán.
Fuente: Captura propia

CONCLUSIONES

El sistema automatizado desarrollado en este trabajo ha demostrado ser una herramienta eficaz para la caracterización de circuitos electrónicos mediante barridos de frecuencia. Su implementación en MATLAB, con control simultáneo de un generador de funciones y un osciloscopio, permitió la obtención automática de diagramas de Bode precisos, reflejando un comportamiento coherente con los modelos teóricos y las simulaciones realizadas.

A diferencia de otros trabajos reportados en la literatura, como BodePlotA [20], que se enfocan en el análisis gráfico de funciones de transferencia modeladas matemáticamente, el presente sistema extiende dicho enfoque hacia la automatización experimental sobre plataformas físicas reales, utilizando instrumentación externa controlada por comandos SCPI. Este aspecto representa un aporte original, al combinar automatización, adquisición experimental y visualización integrada dentro de un mismo entorno de programación.

Asimismo, se atiende un vacío técnico en la literatura nacional: la carencia de plataformas accesibles que permitan a estudiantes o investigadores automatizar pruebas sobre circuitos reales sin requerir software propietario o licencias costosas. Nuestra solución, al basarse únicamente en MATLAB y drivers gratuitos, ofrece una alternativa reproducible, escalable y educativa.

Los resultados confirman que este procedimiento no solo mejora la precisión de las mediciones, sino que elimina la necesidad de realizar procesos manuales repetitivos, reduciendo los tiempos de ejecución y análisis en más del 90 %. Además, permite repetir las pruebas de forma flexible, lo que facilita el aprendizaje, la validación experimental y el análisis de sistemas lineales desde una perspectiva más práctica. De este modo, el usuario puede concentrarse en la interpretación de resultados y no en la ejecución técnica del proceso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, campus Ciudad Guzmán, por las facilidades otorgadas para el uso del equipo de laboratorio necesario en el desarrollo de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

*[1] A. Goswami, "Performance comparison of instrument automation pipelines using different programming languages," *Scientific Reports*, vol. 13, art. 18579, 2023. [En línea]. Disponible en:https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37903822/ . [Accedido: 05-abr-2025].*

[2] I. Burda, "Quartz crystal microbalance with impedance analysis based on virtual instruments: Experimental study," Sensors, vol. 22, art. 1506, 2022.

[3] A. D. Helfrick and W. D. Cooper, Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición, 5ª ed. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1991.

[4] B. Sindhu et al., "Digital control of electronic instruments over SCPI," in Futuristic Trends in Network & Communication Technologies (IIP Series), 2024.

[5] L. Zheng and J. R. Smith, "Influence of instrument selection on measurement reliability in auto-

mated systems," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 72, pp. 1–10, 2023.

[6] MathWorks, "GPIB Interface Overview." [En línea]. Disponible en: https://www.mathworks.com/help/instrument/g pib-interface.html [Accedido: 04-abr-2025].

[7] Tektronix, "AFG3251 Function Generator." [En línea]. Disponible en: https://www.axiomtest.com/Signal- Generators/ARB,-Data,-Function,-Pattern-and- Pulse/Tektronix/AFG3251/Arbitrary-..-Function-Generator,-240-MHz,-1-Ch./ [Accedido: 03-abr-2025].

[8] Keysight Technologies, "82357B USB/GPIB Interface High-Speed USB 2.0." [En línea]. Disponible en: https://www.keysight.com/us/en/product/82357 B/usb-gpib-interface-high-speed-usb-2-0.html [Accedido: 01-abr-2025].

[9] DSO7034A Oscilloscope: 350 MHz, 4 analog channels. [En línea]. Disponible en: https://www.keysight.com/us/en/product/DSO7 034A/oscilloscope-350-mhz-4-analog- channels.html [Accedido: 04-abr-2025].

[10] MathWorks, "Get Started with GPIB Interface." [En línea]. Disponible en: https://www.mathworks.com/help/instrument/w orking-with-the-gpib-interface.html [Accedido: 01-abr-2025].

[11] Keysight Technologies, "IO Libraries Suite Downloads." [En línea]. Disponible en: https://www.keysight.com/us/en/lib/software-detail/computer-software/io-libraries-suite- downloads-2175637.html.

[12] National Instruments, Automating Instrument Control with LabVIEW and NI-VISA: User Guide and Reference. Austin, TX, USA: National Instruments, 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ni.com/en- us/support/documentation.html [Accedido: 02-abr-2025].

[13] PyVISA Developers, "PyVISA: Control your instruments with Python." [En línea]. Disponible en: https://pyvisa.readthedocs.io [Accedido: 25-mar-2025].

[14] MathWorks, "Troubleshooting GPIB Interface." [En línea]. Disponible en: https://www.mathworks.com/help/instrument/tr oubleshooting-gpib-interface.html [Accedido: 01-abr-2025].

[15] H. W. Bode, Network Analysis and Feedback Amplifier Design. New York, NY, USA: Van Nostrand, 1945.

[16] R. P., R. Kumar, y R. Prasad, "Automated Bode plot measurements using MATLAB and GPIB instruments," en Proc. 2021 IEEE Int. Conf. on Intelligent Technologies (CONIT), pp. 1–5, 2021. [En línea]. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/document/9568467 [Accedido: 01-abr-2025].

[17] A. Jajaho, "Bode Plots using MATLAB® & Rigol DS1000Z and DG1000Z," GitHub repository, 2025. [En línea]. Disponible en: https://github.com/Jajaho/Bodeplot [Accedido: 01-abr-2025].

[18] E. J. Marín García, Sistemas de medición electrónica: Generalidades y algo más. Cali, Colombia: Universidad del Valle, Programa Editorial, 2023.

[19] W. Torres, "Código fuente para automatización de mediciones con MATLAB y GPIB," GitHub repository, 2025. [En línea]. Disponible en: https://github.com/willytecnm/BodePlot [Accedido: 04-abr-2025].

[20] F. Barroso, "BodePlotA: Herramienta para el análisis gráfico de sistemas lineales en MATLAB," Revista de Aplicaciones en Ingeniería Electrónica, vol. 12, no. 1, pp. 45–52, 2025.

Multidisciplinario
e
ingenierías
Ingeniantes

Sistema hibrido con control PI para la temperatura en un deshidratador solar de coco

Colaboración
Roberto Tapia Torres; Santiago Arceo Díaz; Flabio Darío Mireles Delgado, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas; ; Elena Elsa Bricio Barrios; Ramona Evelia Chávez Valdez, Tecnológico Nacional de México, campus Colima

Fecha de recepción: 26 de noviembre de 2025
Fecha de aceptación: 02 de diciembre de 2025

Resumen: En la actualidad, el desperdicio de alimentos es una problemática que exige técnicas de preservación eficientes. Este trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema híbrido de deshidratado solar para coco, optimizado mediante un control PI basado en un microcontrolador ESP32 y un sistema de extracción de aire automatizado. El objetivo principal fue regular la temperatura de secado en 55 °C y homogeneizar la humedad interna, mitigando las limitaciones de los deshidratadores solares pasivos ante variaciones climáticas. Para la evaluación del prototipo, se realizó un estudio comparativo entre el proceso con control activo y sin él. Los resultados demostraron la efectividad del control para estabilizar las condiciones térmicas; puntualmente, se logró una humedad final promedio de 3.54 % con el sistema híbrido, frente a un 9.45 % registrado en el proceso sin control. Esto representa una mejora del 62 % en la reducción de humedad. El análisis estadístico mediante t de Student confirmó la significancia de estos resultados ($p < 0.05$), validando que la implementación tecnológica propuesta optimiza el tiempo de secado y asegura la calidad del producto final.

PALABRAS CLAVE: Alimentos deshidratados, Control PID, Deshidratador solar, Energía híbrida, Reducción de humedad.

Abstract: Currently, food waste is a problem that demands efficient preservation techniques. This work presents the design and implementation of a hybrid solar dehydration system for coconut, optimized via a PI control based on an ESP32 microcontroller and an automated air extraction system. The main objective was to regulate the drying temperature at 55 °C and homogenize internal humidity, mitigating the limitations of passive solar dehydrators facing climatic variations. For the prototype evaluation, a comparative study was conducted between the process with active control and the uncontrolled process. Results demonstrated the effectiveness of the control in stabilizing thermal conditions; specifically, an average final moisture content of 3.54% was achieved with the hybrid system, compared to 9.45% recorded in the process without control. This represents a 62% improvement in moisture reduction. Statistical analysis using Student's t-test confirmed the significance of these results ($p < 0.05$), validating that the proposed technological implementation optimizes drying time and ensures final product quality.

KEYWORDS: Dehydrated foods, Humidity reduction, Hybrid energy, PID contro, Solar dehydrator.

INTRODUCCIÓN

El desperdicio de alimentos es un problema global que afecta significativamente la seguridad alimentaria. Específicamente en el sector de frutas y hortalizas, se estima que las pérdidas pueden alcanzar hasta el 45 % de la producción anual [1]. Aunque métodos convencionales como la cadena de frío ayudan a la preservación, estos incrementan los costos de producción y ofrecen un tiempo de vida útil limitado [2, 3]. En contraste, la construcción eficiente de secadores solares se plantea como una estrategia viable para reducir pérdidas postcosecha [4].

Existen distintos tipos de secadores solares, cada uno con características específicas para optimizar la calidad del producto final, tales como cuidar la conservación del color o textura, protegerlos de la contaminación por partículas de polvo o asegurar una temperatura óptima. Los secadores de exposición directa pueden deteriorar la calidad del alimento por radiación UV excesiva, mientras que el secado indirecto puede fomentar el crecimiento de microorganismos si las condiciones ambientales no son ideales. Por otro lado, los secadores híbridos alimentados por gas LP o resistencias eléctricas, aunque efectivos, representan una inversión elevada y un gasto operativo continuo [5]. Sin embargo, en términos de impacto ambiental y económico, se ha estimado que un secador solar puede ahorrar costos significativos en combustible y evitar la emisión de toneladas de CO_2 en comparación con sistemas convencionales de gas [6].

A pesar de estas ventajas, el control preciso de la temperatura y la humedad sigue siendo el factor crítico para optimizar el secado [7]. La implementación de tecnología para este fin puede ser de bajo costo; por ejemplo, existen diseños que permiten modular el flujo de aire de forma remota, mejorando la eficiencia [8]. Asimismo, la tendencia actual se orienta hacia sistemas inteligentes que emplean microcontroladores (como ESP32) y sensores (DHT22) para automatizar el monitoreo y registro de datos [9].

La literatura indica que para asegurar la inocuidad alimentaria es necesario inhibir la actividad microbiana mediante una regulación térmica adecuada. La implementación de controles básicos tipo on-off ha demostrado mejorar la homogeneidad del proceso [10]. No obstante, sistemas híbridos que integran algoritmos de control PI o PID logran una estabilización superior de las variables de temperatura y humedad, resultando en productos con menor humedad final y mejor calidad [11, 12]. Además, la integración de la energía solar no solo para el calentamiento, sino para alimentar los sistemas de control, favorece la autosuficiencia energética del equipo [13].

Considerando lo anterior, este trabajo propone el diseño e implementación de un sistema de control PI que transforma un deshidratador solar pasivo en un sistema híbrido. Esta propuesta busca reducir los costos operativos disminuyendo el uso de la red eléctrica, al tiempo que compensa las deficiencias de la variabilidad climática mediante calefacción auxiliar controlada. El objetivo es optimizar el proceso de secado específicamente para el coco, disminuyendo los tiempos de deshidratado y reduciendo el riesgo de contaminación o fermentación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caso de estudio y justificación

El presente estudio se realizó en colaboración con la empresa “Camparte S.A. de C.V.”, ubicada en Cuyutlán, Colima, dedicada a la producción de deshidratados [15]. Aunque la empresa procesa diversos productos como yaca, jamaica y mango, se seleccionó el coco (Cocos nucifera) como objeto de estudio debido a su relevancia económica y cultural en la región. México se posiciona como el cuarto productor mundial de este fruto y Colima destaca como el segundo productor a nivel nacional, aportando más de 300,000 toneladas anuales [14].

La abundancia de coco fresco y su alto contenido de humedad hacen de este fruto un candidato ideal para probar la eficiencia de remoción de agua del sistema, ya que es particularmente sensible al deterioro oxidativo si no se procesa adecuadamente. Optimizar las técnicas de secado no solo reduce el desperdicio, sino que permite aprovechar al máximo su valor comercial y propiedades nutricionales.

Descripción del sistema experimental

Se empleó un deshidratador solar de modo mixto con dimensiones de 81 x 81 x 146 cm. El equipo está acoplado a un colector solar de 81 x 30 x 120 cm que precalienta el aire, mientras que la estructura de la cámara permite también la incidencia de radiación solar sobre las charolas de producto. El flujo de aire se gestiona mediante convección natural asistida.

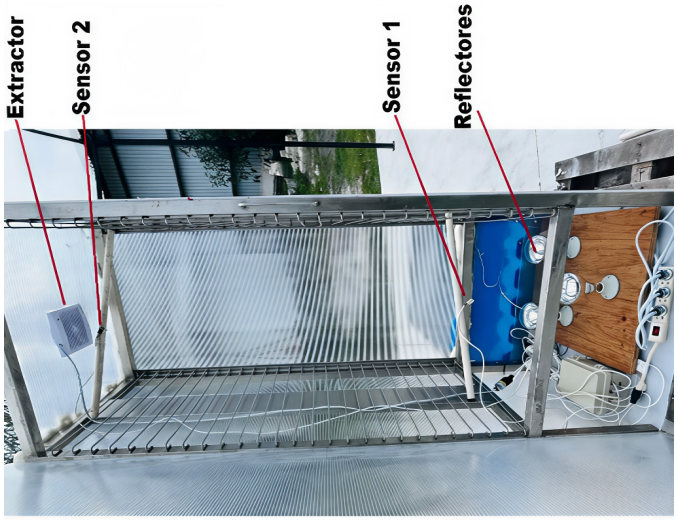


Figura 1. Secador solar analizado en este estudio.
Fuente: Elaboración propia.

Para transformar el equipo en un sistema híbrido, se diseñó e implementó un módulo de control basado en un microcontrolador ESP32. El sistema de actuación térmica consta de tres reflectores incandescentes de 250 W ubicados en la base, regulados por un dimmer MY-9892 de 2000 W. Este actuador es controlado mecánicamente por un servomotor que modula el voltaje de alimentación según la señal de control. Todo el circuito de potencia, control y adquisición de datos fue ensamblado en una placa de circuito impreso (PCB) fabricada con

componentes estándar de electrónica comercial [16], protegida por una carcasa de PLA impresa en 3D.

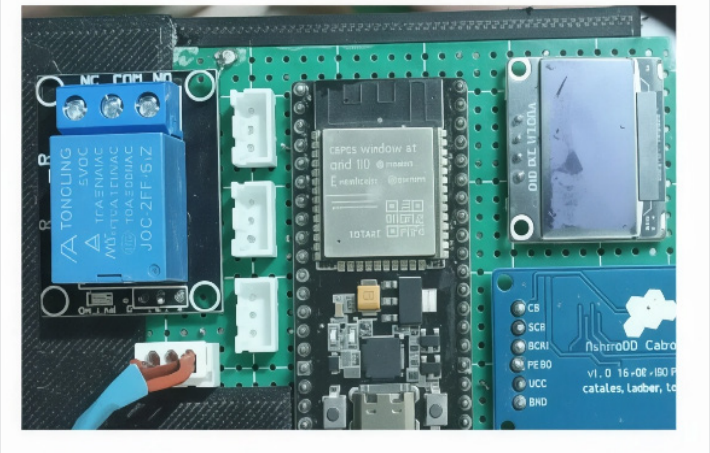


Figura 2. PCB del controlador.
Fuente: Elaboración propia.

Para el monitoreo y control de la temperatura y humedad se instalaron sensores DHT22 (precisión ±0.5 °C y ±2 % HR) distribuidos estratégicamente:

Sensor 1 (Zona baja): Ubicado sobre los reflectores. Su lectura es la variable de retroalimentación principal para el control PI de temperatura.

Sensor 2 (Zona alta): Monitorea la humedad relativa en la salida de aire; este valor determina la activación del extractor para la renovación del aire saturado.

Sensor 3 (Colector/Exterior): Registra las condiciones de entrada como referencia comparativa.

Adicionalmente, se automatizó un extractor de aire en la chimenea, configurado para activarse cuando la temperatura inferior supera los 65 °C o la humedad relativa superior excede el 35 %, favoreciendo así la homogeneidad térmica.

Diseño del control

La caracterización térmica se realizó mediante la respuesta al escalón en una cámara de prueba aislada, aplicando 120 V a la carga resistiva. A partir de la curva de reacción, se obtuvo un modelo de primer orden con retardo (Ec. 1), determinando una constante de tiempo = 54s. Los parámetros del controlador PI (Kp=2.06, Ki=0.062) se sintonizaron utilizando la herramienta PID Tuner de MATLAB/Simulink [17], priorizando la estabilidad sobre la velocidad de respuesta para evitar oscilaciones térmicas.

$$G(s) = \frac{d}{s + b} \qquad \text{Ec. (1)}$$

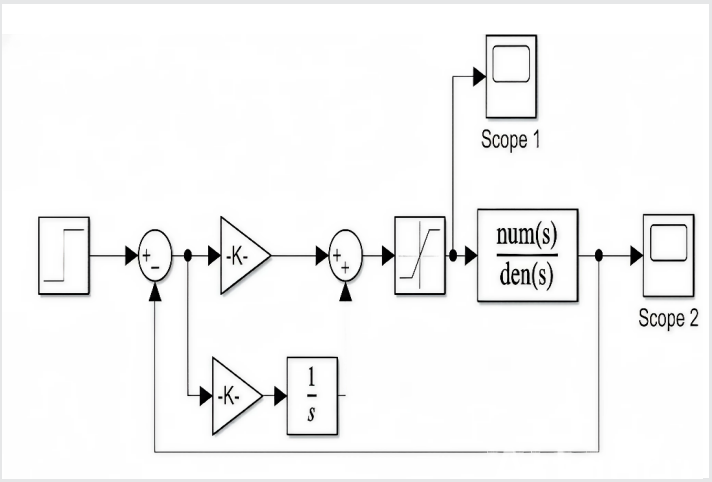


Figura 3. Simulación Simulink para obtener las ganancias del controlador.
Fuente: Elaboración propia.

Protocolo experimental y análisis estadístico

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en enero de 2025, utilizando coco rallado fresco distribuido en cuatro charolas con una carga inicial aproximada de 750 g cada una. Se estableció un diseño comparativo con dos tratamientos:

Secado híbrido controlado: Se configuró un set-point de 55 °C, temperatura seleccionada para maximizar la evaporación sin degradar las propiedades organolépticas del coco. Asimismo, se habilitó la extracción automática, sistema que fuerza la salida del aire mediante un ventilador cuando los sensores detectan que la humedad relativa interior supera el 35 %, evitando así la saturación de la cámara.

Secado solar pasivo: Sin control activo de temperatura ni renovación forzada de aire, dependiendo exclusivamente de las condiciones ambientales.

Ambos tratamientos se evaluaron en el mismo horario (10:00 h a 15:30 h). Para validar la significancia de los resultados, se aplicó una prueba t-Student para muestras independientes con un nivel de confianza del 95 % (α = 0.05), utilizando el software estadístico Python (biblioteca SciPy). Este análisis permite determinar si la diferencia en la humedad final entre ambos métodos es significativa. La determinación del contenido de humedad final se realizó mediante el método gravimétrico, registrando la diferencia de peso de las muestras en cada charola al inicio y al final de los ciclos de secado.

RESULTADOS

Discusión

Comportamiento térmico y estabilidad

El desempeño del controlador PI se evaluó comparando los perfiles de temperatura y humedad inter-

na durante los ciclos de operación. En la configuración con el sistema de control activo, se observó una estabilización de la temperatura cercana al set-point de 55 °C, mitigando las fluctuaciones drásticas provocadas por la variabilidad de la radiación solar.

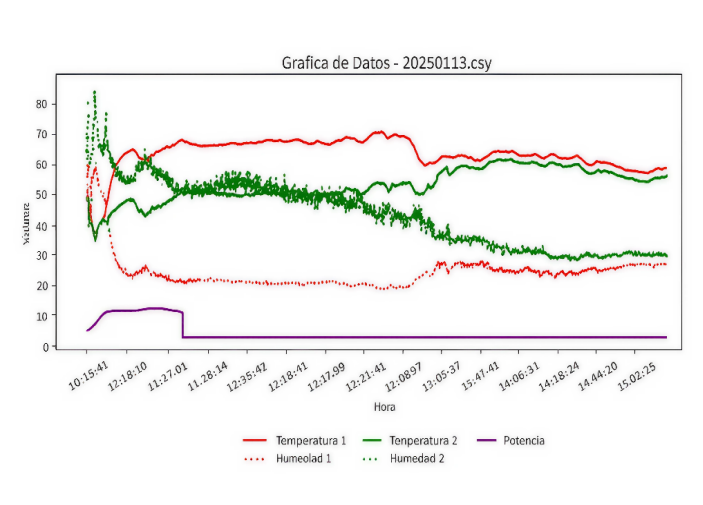


Figura 4. Cambio de humedad y temperatura respecto al tiempo en el interior del interior del deshidratador. 13 de enero 2025.
Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Figura 4, la intervención de los reflectores (línea morada de potencia) compensa las caídas térmicas, manteniendo condiciones constantes. Por el contrario, en las pruebas sin control Figura 5, la temperatura interna mostró una dependencia directa de las condiciones ambientales, con tiempos de calentamiento más lentos y oscilaciones que dificultan la deshidratación homogénea.

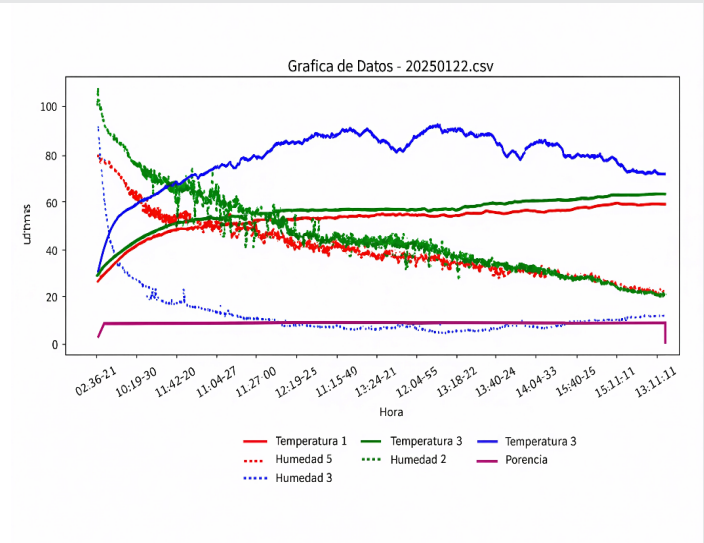


Figura 5. Cambio de humedad y temperatura respecto al tiempo en el interior del interior del deshidratador 22 de enero del 2025.
Fuente: Elaboración propia.

Análisis de humedad del producto

La efectividad del sistema híbrido se refleja cuantitativamente en el contenido de humedad final del coco. Las Tablas 1 y 2 resumen los valores de humedad final promedio (%) alcanzados en cada charola al término de cada jornada diaria de pruebas.

Debido a que las tablas presentan directamente los porcentajes finales, es necesario detallar que estos se obtuvieron mediante el método gravimétrico. Este método se basa en la relación directa entre la pérdida de masa y la evaporación de agua. Dado que la materia seca del coco permanece constante, cualquier disminución de peso durante el proceso corresponde al agua eliminada. Por lo tanto, se registró el peso inicial de la muestra fresca y el peso final al concluir el ciclo diario; la diferencia entre ambos valores se utilizó para calcular el porcentaje de humedad remanente en el producto reportado en las tablas.

Tabla 1. Humedad en producto final con control. Porcentaje de humedad (%). Enero 2025.

Fecha	Charola 1	Charola 2	Charola 3	Charola 4
Enero 13	2.7	2.8	13.3	7.7
Enero 14	1.1	2.3	3.2	4.8
Enero 15	2.4	1.5	3.7	2.2
Enero 16	2.2	1.3	2.9	2.5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Humedad en producto final sin control. Porcentaje de humedad (%). Enero 2025

Fecha	Charola 1	Charola 2	Charola 3	Charola 4
Enero 21	11.1	11.5	15.1	9.8
Enero 22	12	11.9	14.3	10.5
Enero 23	5	4.7	10.3	10.5
Enero 24	5.5	5	6.9	7.1

Fuente: Elaboración propia.

El promedio de humedad registrado con el sistema de control fue de 3.54 %, mientras que el proceso pasivo (sin control) alcanzó un promedio de 9.45 %. Esta diferencia representa una reducción del 62.5 % en la humedad retenida a favor del sistema híbrido.

El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el software Python (versión 3.11) mediante la biblioteca científica SciPy. Se seleccionó la prueba t-Student para muestras independientes debido a que el diseño experimental compara las medias aritméticas de dos grupos distintos (sistema híbrido vs. testigo pasivo) que no presentan relación de dependencia entre sí. Los resultados de dicha prueba arrojaron un valor t = -5.23 y un valor p = 1.24 x 10^$^{-5}$. Dado que p < 0.05, se rechaza la hipótesis nula, confirmando que la diferencia en la humedad final es estadísticamente significativa y atribuible al desempeño del controlador. Esto concuerda con lo reportado por Purnomo y Dewi [11], quienes demostraron que la estabilidad térmica impacta directamente en la eficiencia de la eliminación de agua.

Evaluación cualitativa del producto

Además de los parámetros fisicoquímicos, se observaron diferencias notables en la calidad sensorial del producto. El coco procesado sin control presentó una coloración parda heterogénea, mostrado en la Figura 7. Esta pigmentación es indicativa de reacciones de pardeamiento no enzimático (reacción de Maillard) y caramelización, fenómenos químicos que se aceleran exponencialmente ante picos de temperatura no regulados y que degradan la calidad visual y nutricional del alimento [18].

Figura 6. Producto terminado, prueba sin control. Enero 22 Fuente: Elaboración propia.

En contraste, el producto obtenido con el sistema de control mantuvo una apariencia blanca y textura uniforme (Figura 8), características deseables en el mercado de snacks deshidratados. La regulación precisa de temperatura, combinada con la extracción de aire automatizada, evitó la saturación de humedad en la cámara, factor que Elmehri [8] identifica como crítico para prevenir el crecimiento microbiano y el deterioro visual.

Figura 7. Producto terminado, prueba con control. Enero 13. Fuente: Elaboración propia.

La implementación del microcontrolador ESP32 y los sensores DHT22 permitió no solo la actuación precisa, sino también la recolección de datos que valida la superioridad del secado activo frente al pasivo, superando las limitaciones de los sistemas tradicionales mencionadas en la literatura [5].

CONCLUSIONES

El diseño e implementación de un sistema híbrido con control PI permitió optimizar significativamente el proceso de deshidratado solar de coco. La regulación automática de la temperatura en 55 °C, asistida por calefacción eléctrica y extracción de aire, logró una reducción del 62 % en la humedad final del producto en comparación con el método pasivo tradicional.

El análisis estadístico validó que el sistema propuesto garantiza una menor variabilidad en el proceso, obteniendo una humedad promedio de 3.54 %, nivel óptimo para la conservación del alimento. Adicionalmente, la evaluación cualitativa evidenció que el control activo previene el deterioro por sobrecalentamiento, conservando mejor las propiedades organolépticas (color y textura) del coco.

Finalmente, la validación del prototipo confirma que es posible modernizar los métodos tradicionales de secado mediante el uso de electrónica de bajo costo. Al reducir la dependencia de las condiciones meteorológicas, esta propuesta ofrece a los productores una herramienta accesible para estandarizar su producción y disminuir mermas, sin incurrir en los altos costos de inversión que requieren los sistemas industriales convencionales.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Camparte S.A. de C.V. por su disposición y colaboración durante la realización de las pruebas experimentales. En particular, se reconoce la vinculación y el apoyo técnico brindado por las ingenieras Cyndi Guardado y Xiomara García. Asimis-

mo, se extiende un agradecimiento a la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado mediante la beca otorgada para la realización de estudios de posgrado.

BIBLIOGRAFÍA

[1] FAO. (2022). Hacer frente a la pérdida y el desperdicio de alimentos: Una oportunidad de ganar por partida triple. Newsroom. https://www.fao.org/newsroom/detail/FAO-UNEP-agriculture-environment-food-loss-waste-day-2022/es.

[2] EY Global. (2021). Panorama de la cadena de frío en México. https://www.ey.com/es_mx/insights/consumer-products/cadena-de-frio-en-mexico.

[3] Foodsafety. (2019, abril 12). Cold Food Storage Chart [Page]. https://espanol.foodsafety.gov/tablas-de-seguridad-alimentaria-mfu8/Tabla-de-conservaci%C3%B3n-de-alimentos-fr%C3%ADos.

[4] Yao, y. et al. (2022). A review study on recent advances in solar drying. Renewable and Sustainable Energy Reviews. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111979.

[5] Kimaro, D. et al. (2024). Uncovering socioeconomic insights of solar dryers for sustainable agricultural product preservation: A systematic review DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40726.

[6] Elavarasan, R. M., & Pugazhendhi, R. (2025). Drying characteristics, environmental and economic analysis of a solar dryer. Scientific Reports, Nature.https://doi.org/10.1038/s41598-025-94194-9.

[7] Tiwari, G. N., et al. (2012). Variation of drying temperature, relative humidity and solar radiation in a solar cabinet dryer. Renewable Energy and Sustainable Development. DOI:10.1080/07373930802466872

[8] Elmehri, M., Ferreira, J. P., & Cunha, J. B. (2020). Design of a control system for an indirect solar dryer. Instituto Politécnico de Bragança.

[9] Badruddin, I. A., et al. (2021). Solar dryer with electronic PID controller for dry potato production. International Journal of Scientific Research and Engineering Development. https://doi.org/10.12912/27197050/143784.

[10] Solanki, S. K., et al. (2023). Automation of Solar Dryer. International Journal of Applied Research and Innovation in Information Technology (IJARIIT), 11(1), 1244. ISSN: 2454-132X.

[11] Prabowo, B. S., Prasetyo, A. R., & Wicaksono, F. A. (2023). Development of drying system by using internet of things for food. Procedia Computer Science. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100219.

[12] Purnomo, M. H., & Dewi, N. A. (2022). Controlling temperature using proportional integral and derivative control algorithm for hybrid forced convection solar dryer. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 12. DOI: 10.11591/ijece.v14i1.pp239-247.

[13] Patil, A., et al. (2024). DEVELOPMENT OF AN IOT-BASED SOLAR BANANA DRYER. Kalahari Journal of Engineering and Technology, 7(1), 449–456. ISSN: 0974-5823.

[14] SIAP, "Anuario estadístico de la producción agrícola - Coco," Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2023. [En línea]. Disponible: https://www.gob.mx/siap/.

[15] Camparte S.A. de C.V., "Inicio - Snacks," s.f. [En línea]. Disponible: https://www.campartemx.com/ [Accedido: 02-jul-2025].

[16] Steren. (s.f.). Steren México. https://www.steren.com.mx.

[17] MathWorks. (s.f.). PID Tuner App. https://es.mathworks.com/help/control/ref/pidtuner-app.html.

[18] S. Badui Dergal, Química de los alimentos, 6.ª ed. Ciudad de México: Pearson Educación, 2016.

Multidisciplinario
e
ingenierías
Ingeniantes

Construcción e instrumentación de un edificio a escala pequeña para simulación de sismos por medio de modelos matemáticos

Colaboración
Irving Naim Rodríguez Barragán; Antonio Concha Sánchez, Universidad de Colima, Colima

Fecha de recepción: 18 de septiembre 2025
Fecha de aceptación: 13 de septiembre de 2025

RESUMEN: Se presenta el diseño, construcción, instrumentación y análisis de un edificio a escala reducida para su estudio en una mesa vibratoria de pruebas sísmicas. La estructura se modela en AutoCAD, cuenta con pisos de madera, columnas de aluminio, masas de acero y está instrumentada con sensores MPU-6050 (acelerómetro-giroscopio) conectados a una Raspberry Pi 3. Esto conlleva a un prototipo de bajo costo, con escalabilidad modular, alta repetibilidad y fines académicos a diferencia de los que suelen ser con el objetivo de investigación. La tarjeta Raspberry permite la adquisición de 30 lecturas por segundo, lo que posibilita graficar la aceleración y el desplazamiento de ambos pisos del edificio en tiempo real. Además, la Raspberry almacena los datos en un archivo CSV para su posterior análisis. Se calcula la rigidez, así como las propiedades dinámicas del edificio, para su estudio experimental realizado en una mesa vibratoria simulando el terremoto de Northridge del año 1994. La estructura es efectiva para analizar el comportamiento ante excitaciones dinámicas que simulan sismos, validando el modelo matemático mediante pruebas experimentales controladas.

PALABRAS CLAVE: Edificio reducido, acelerómetro, MPU-6050, rigidez estructural, Raspberry Pi 3.

ABSTRACT: This paper presents the design, construction, instrumentation, and analysis of a small-scale building for seismic testing on a shake table. The structure is modeled in AutoCAD and features wooden floors, aluminum columns, steel masses, and MPU-6050 sensors (accelerometer-gyroscope) connected to a Raspberry Pi 3. This results in a prototype with a low cost, modular scalability, high repeatability and academic purposes, unlike those that are usually for research purposes. The Raspberry board allows data acquisition at 30 readings per second, enabling real-time plotting of acceleration and displacement for both floors of the building. Additionally, the Raspberry Pi stores the data in a CSV file for further analysis. The stiffness and dynamic properties of the building are calculated for experimental study made in a shake table simulating the 1994 Northridge earthquake. The structure is effective for analyzing behavior under dynamic excitations simulating earthquakes, validating the mathematical model through controlled experimental testing.

KEYWORDS: scaled building, accelerometer, MPU-6050, structural stiffness, Raspberry Pi 3.

INTRODUCCIÓN

Los terremotos a lo largo de la historia se han caracterizado por su poder destructivo y por ser impredecibles. En la actualidad no se cuenta con tecnología que permita anticipar uno de estos eventos, por lo que se desconoce dónde puede ocurrir uno, cuando y su magnitud. De los registros que se tienen de los últimos 100 años, el de mayor magnitud fue el de Valdivia, Chile (1960) con una duración de 10 minutos y 9.5 grados de magnitud en la escala Richter, publicado por la revista Muy interesante [1].

De acuerdo con Espíndola [2], los sismos se originan por movimiento, fricción y deformación de las placas tectónicas. En la superficie o en el interior de la Tierra se generan perturbaciones que viajan y son adquiridas por los sismógrafos. Los primeros sismógrafos fueron ideados a finales del siglo XIX, siendo registrados en una hoja de papel en movimiento con una plumilla que inscribía el movimiento como se muestra en la Figura 1, posteriormente, se actualizó a los sismogramas digitales.

Un edificio que vibra está definido por su masa, amortiguamiento y rigidez. Esto ha sido de interés en las últimas décadas, debido a que permite determinar las propiedades dinámicas de la estructura, tal como sus frecuencias naturales y también su respuesta a excitaciones, como terremotos [3].

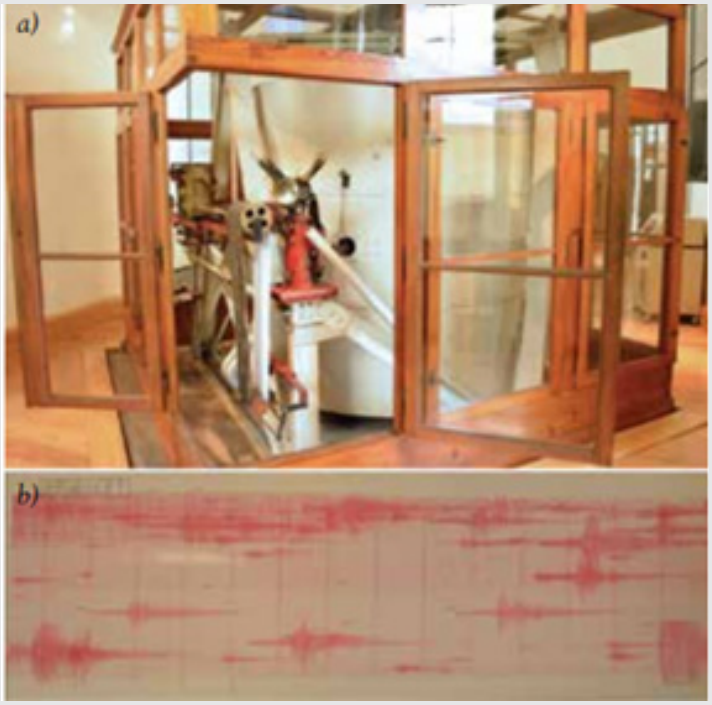


Figura 1. a) Sismógrafo horizontal, se encuentra en el museo de Geofísica de la UNAM.
Fuente: Recuperada de [2].

En el trabajo de Concha [3], se desarrolla el modelo matemático de un edificio torsional experimental a escala reducida, validando el comportamiento dinámico mediante pruebas con una mesa vibratoria. Se realiza un análisis comparativo entre los resultados teóricos (simulaciones) y experimentales, con el fin de optimizar una estrategia de control de vibraciones del edificio.

Como menciona Martínez [4], para el modelado matemático es clave describir lo más exacto posible los parámetros del edificio reducido. Con ello es posible obtener las ecuaciones que permitan simular el comportamiento dinámico, utilizando una señal sísmica como excitación.

Dentro del laboratorio de Control de Vibraciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se encuentra una estructura para investigaciones que utiliza amortiguadores magnetoreológicos en la atenuación de las vibraciones inducidas en edificios por sismos. Esta estructura cuenta con motores lineales, sensores de desplazamiento LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 0356 de Transtek, Acelerómetros US5 de CFX Technologies, centro de comando y una interfaz conectada a los sensores para su monitoreo [5].

El trabajo realizado por Guégen et al. [6] analiza la respuesta torsional de un edificio de concreto reforzado mediante la comparación de las rotaciones de acelerómetros triaxiales y las obtenidas directamente mediante el sensor rotacional BlueSeis-3A, el cual es un giroscopio óptico de alta sensibilidad. El trabajo resalta la precisión que tienen estos sensores rotacionales dedicados a la captura de modos torsionales, pero tienen un costo elevado al ser especializados y con requerimientos específicos.

Por otro lado, la investigación de Kurzych et al. [7] presenta un estudio experimental de un sensor rotacional basado en fibra óptica (FORSEM), el cual mide directamente la rotación alrededor del eje vertical en estructuras de laboratorio. El dispositivo es compacto (0.36 m x 0.36 m x 0.16), autónomo y permite control vía internet. Los sensores FORSEM son una alternativa con características similares al BlueSeis-3A, ofreciendo una precisión rotacional cercana, con un costo estimado entre US 3,500 y US $5,900, el precio exacto del sensor BlueSeis-3A no se encuentra públicamente disponible y puede variar dependiendo de las configuraciones y aplicaciones requeridas.

El objetivo de este trabajo es proponer el diseño, construcción e instrumentación de un edificio reducido, implementando una técnica de adquisición de datos de bajo costo, como se muestra en la Tabla 1, basada en una Raspberry Pi 3, la cual logra almacenar los datos de dos módulos MPU 6050 para adquirir la posición y aceleración de los pisos en formato CSV para su posterior análisis. Mediante el uso de una mesa vibratoria de dos ejes (“X” y “Y”), se excita la estructura reducida simulando un sismo, permitiendo adquirir los datos de los sensores durante la prueba. A diferencia de la estructura de la UNAM [5], la propuesta no requiere software comercial para la adquisición de datos de los sensores, es portable, y es accesible para regiones con recursos limitados de laboratorio.

El resto del artículo se organiza como sigue: la sección 2 presenta el modelado en 3D detallado del edificio reducido, su instrumentación con módulos MPU-6050, así como su modelo matemático, cálculo de rigideces, frecuencias naturales y factores de

participación. La sección 3 describe la prueba experimental realizada, se muestran los gráficos de las señales: sísmica y aceleración y desplazamiento de la estructura y de la transformada rápida de Fourier de cada piso. Finalmente, las conclusiones resaltan la validez experimental del modelo propuesto.

Tabla 1. Ítems seleccionados de PRISMA 2020.

Características	MPU-6050	BlueSeis-3A (Guégen et al.)	FORSEM (Kurzych et al.)
Tipo de sensor	MEMS 6DOF (acelerómetro + giroscopio)	Giroscopio de fibra óptica (FOG), rotacional puro	Giroscopio de fibra óptica (FOG, tipo Sagnac)
Precisión	~0.061°/s (con escala ±250°/s)	~10−7 rad/s (estimado por el fabricante)	2·10−8 rad/s/√Hz (teórica)
Software	Librería s I2C	Software especializado de análisis sísmico	Software dedicado, interfaz remota vía internet
Costo	~6–7 USD	> 10 000 U SD	No comercial, prototipo de investigación.
Aplicación	Prototipos, proyectos académicos	Monitoreo Torsional en edificios reales	Laboratorio de investigación estructural torsional

Fuente: Elaboración propia.

Modelado del Edificio

Diseño 3D

En la etapa inicial del modelado 3D del edificio, se definieron las condiciones mecánicas y electrónicas para lograr el funcionamiento deseado de la estructura para la simulación de un sismo. El modelado del edificio reducido se realizó en el programa de diseño AutoCAD. Este software cuenta con precisión al diseñar, lo que facilita la creación de modelos exactos. También, cuenta con herramientas que simplifican la generación de planos para su fabricación. Primeramente, se modeló cada una de las piezas con las que cuenta el prototipo para realizar un ensamblaje digital, y posteriormente se fabricaron cada una de las partes.

La estructura cuenta con 2 pisos, los cuales tienen 4 columnas. Cada piso es de madera cuyas dimensiones son 250 mm de largo, 120 mm de ancho y un espesor de 10 mm. Las columnas son de aluminio con una altura de 300 mm, 19 mm de ancho y un espesor de 1.4 mm. La sujeción de las columnas al nivel es mecánica con tornillos de 5/16“ de diámetro a una escuadra de metal que mantiene toda la estructura unida, como se observa en la Figura 2.

El material utilizado para la construcción de dicha estructura es reciclado, ya que se encontraba dentro del Taller de máquinas herramienta de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad de Colima por lo que no tuvo costo de insumos para la elaboración.

Adquisición de datos y sensores

La Raspberry Pi 3 es una computadora que permite controlar hardware con Python. Esta placa permite la creación de códigos mediante el programa Geany para la lectura de datos de los sensores que se le conecten, así como para realizar el almacenamiento de estos datos. Para el funcionamiento de la Raspberry se requiere de una pantalla, un teclado, un ratón y de una fuente de alimentación [8].

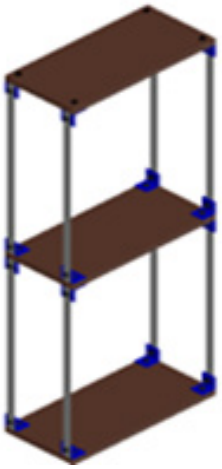


Figura 2. Modelado 3D del edificio reducido.
Fuente: Elaboración propia.

Con las librerías smbus2 es posible la comunicación I2C entre la Raspberry y los sensores MPU-6050. Estos sensores se conectaron a un multiplexor TCA9548A para la lectura simultánea por el mismo bus utilizando los puertos SDA y SCL tanto de la Raspberry como del módulo MPU. Por otro lado, la librería matplotlib se emplea para visualización de los datos en tiempo real.

Los módulos están instalados en el borde del piso 1 y 2, con los cuales se obtienen las mediciones de aceleración y desplazamiento de los pisos durante las pruebas que se realizan. Su conexión se muestra en la Figura 3.

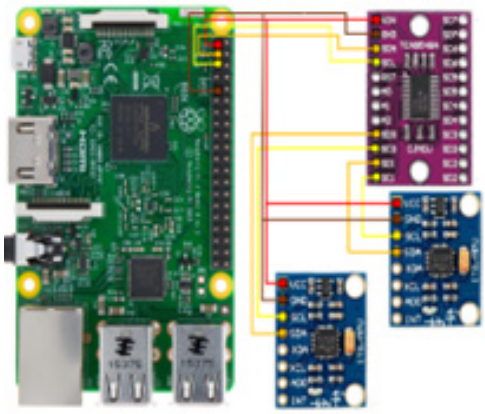


Figura 3. Conexiones del MPU-6050, multiplexor y Raspberry Pi 3.
Fuente: Elaboración propia.

La Raspberry Pi 3 adquiere 30 muestras por segundo del sensor MPU-6050, lo que permite una calibración automática para compensar el bias inicial. Además, mediante código integrado, la Raspberry Pi puede generar gráficos en tiempo real del desplazamiento y la aceleración de los pisos, eliminando la necesidad de software externo para su procesamiento. Más aún, los datos de los señores son almacenados en un archivo .CSV (Comma Separated Values) que facilita su exportación a otros programas para realizar análisis de estos.

El diagrama mostrado en la Figura 4 ilustra el proceso completo de medición de vibraciones. Este inicia con la inicialización del sistema y calibración automática de los sensores para determinar su bias. Durante la operación normal, el sistema ejecuta de manera cíclica, a 30 Hz, la lectura de los acelerómetros, la corrección del bias, el filtrado de las señales, el almacenamiento de datos en formato CSV y la actualización de los gráficos en tiempo real. Al concluir la prueba, el proceso finaliza de forma ordenada, garantizando la integridad de los datos registrados. Este flujo asegura mediciones precisas y sincronizadas con la excitación sísmica aplicada.

Figura 4. Diagramade flujo detallado del sistema de adquisición de datos.
Fuente: Elaboración propia.

Modelo matemático del edificio

El edificio reducido consta de 2 pisos, como se muestra en la figura 5. El primer piso tiene una masa de 5.14 kg y el segundo una masa de 3.58 kg. Cuenta con 4 columnas de aluminio, el cual tiene un módulo de elasticidad de 68.9 GPa. Cada columna tiene una altura de 0.3 m y son de forma rectangular con un ancho de 0.0193 m por 0.0014 m de espesor.

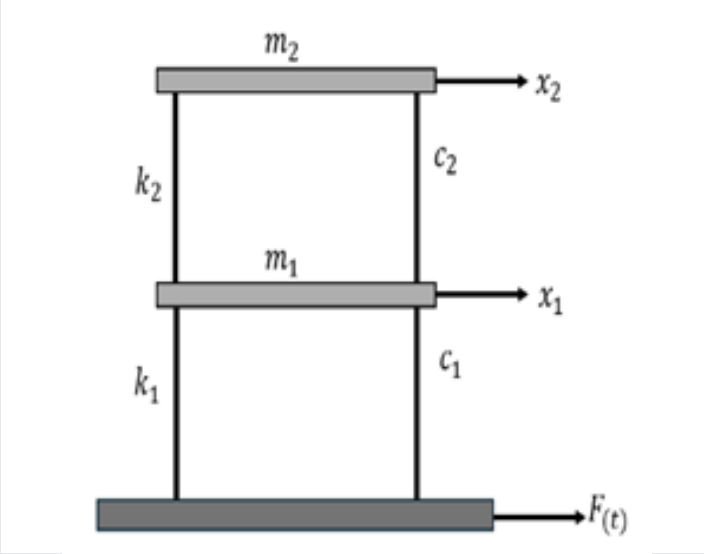


Figura 5. Edificio de dos pisos.
Fuente: Elaboración propia.

La fórmula para encontrar el segundo momento de inercia de cada columna es:

$$I = \frac{b^3 a}{12} \qquad \text{Ec. (1)}$$

La rigidez de la columna se calcula como:

$$k = \frac{12EI}{L^3} \qquad \text{Ec. (2)}$$

Obteniendo una rigidez de las 4 columnas de aluminio de 532.1742 KN/m.

Matriz de rigidez y masa
La matriz de rigidez K y la matriz de masa M del edificio se define como:

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (3)}$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (4)}$$

Donde ki es la rigidez del piso dada en (2), y mi es la masa para cada piso. Estas matrices están dadas por:

$$K = \begin{bmatrix} 1{,}064.34 & -532.174 \\ -532.174 & 532.174 \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (5)}$$

$$M = \begin{bmatrix} 5.14 & 0 \\ 0 & 3.58 \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (6)}$$

Donde las unidades de K son N/m, mientras que las de la masa M son kg.

Modelo matemático del edificio
Las frecuencias naturales ωi, i=1,2 y los modos de vibración $\emptyset i$ se obtienen resolviendo el siguiente problema de valores propios:

$$(K - \omega^2 M)\emptyset = 0 \qquad \text{Ec. (7)}$$

Las frecuencias naturales en rad/s se calculan tomando la raíz cuadrada de los valores propios de la matriz M-1K. Estas frecuencias (rad/s) son:

$$\omega = [7.0982, 17.4693]^T \quad \text{Ec. (8)}$$

Las frecuencias naturales en Hz del edificio son:

$$f = [1.1297, 2.7803]^T \quad \text{Ec. (9)}$$

Los modos de vibración Øi correspondientes a estas frecuencias son:

$$\emptyset_1 = [-1.0541, 1]^T, \quad \emptyset_2 = [-0.8011, -1.2122]^T \quad \text{Ec. (10)}$$

Esto representa que mientras que la estructura se excita con la frecuencia ω1, los pisos se mueven en direcciones opuestas. Por otro lado, en la frecuencia ω2 los pisos se encuentran en fase, es decir, se desplazan en el mismo sentido, como se muestra en la Figura 6.

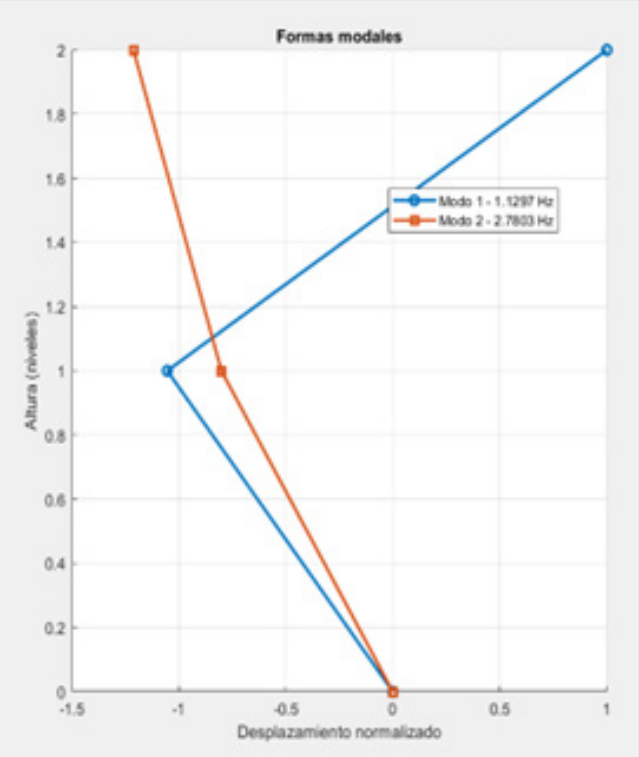


Figura 6. Representación de los modos de vibración.
Fuente: Elaboración propia.

Amortiguamiento modal

El amortiguamiento modal ζi, i=1,2 se calcula utilizando amortiguamiento Rayleigh de la siguiente manera:

$$C = \alpha M + \beta K \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde α y β son coeficientes que se determinan para lograr el factor de amortiguamiento deseado. En este caso 5% de factor de amortiguamiento en los modos de interés, resultando:

$$\alpha = 0.1, \quad \beta = 0.1 \quad \text{Ec. (12)}$$

Y se calcularon a partir de la siguiente formula:

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\omega i} + \frac{\beta \omega i}{2} \quad \text{Ec. (13)}$$

Factores de participación

Los factores de participación Ti indican la contribución de cada modo a la respuesta total del sistema. Se calcula como:

$$T_i = \frac{\emptyset_i^T ML}{\emptyset_i^T M \emptyset_i} \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde L es el vector de influencia, que para un sismo en un solo eje es un vector de unos. Los resultados obtenidos son:

$$T = [-0.1978, -0.9881]^T \quad \text{Ec. (15)}$$

Este resultado indica que el segundo modo contribuye más a la respuesta sísmica que el primer modo.

RESULTADOS

Experimentales

Se realizó una prueba experimental utilizando la mesa vibratoria de la Figura 7, que se encuentra en el laboratorio de Mecatrónica, de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad de Colima. En esta mesa vibratoria se sujetó el edificio reducido y se generó una excitación simulando el terremoto Northridge de 1994 escalado, cuya aceleración se muestra en la Figura 8.

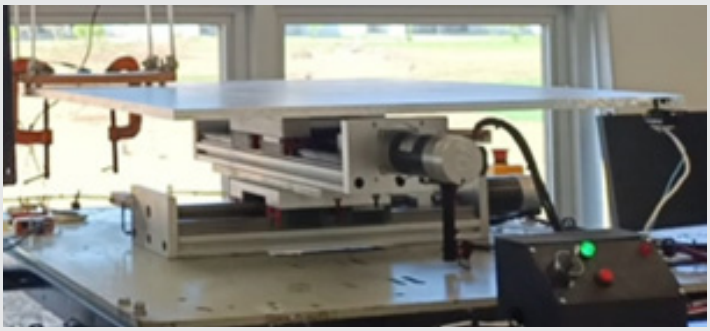


Figura 7. Mesa vibratoria ubicada en el laboratorio de mecatrónica de la FIME, Universidad de Colima.
Fuente: Elaboración propia.

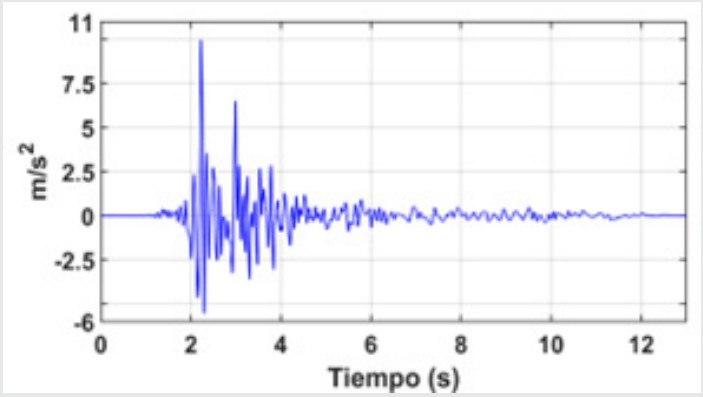


Figura 8. Aceleración de la mesa vibradora.
Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la Figura9, los dos módulos MPU 6050 están colocados en el primer y segundo piso de la estructura. Para la prueba, la base de la estructura se fijó sobre la mesa vibratoria, y posteriormente se generó el movimiento sísmico, mientras que la Raspberry Pi 3 almacenaba los datos.

Figura 9. Vista superior de la ubicación de los módulos MPU-6050 en el edificio a escala.
Fuente: Elaboración propia.

Irving Rodríguez [9] presenta el video del experimento. Durante la prueba experimental se observó la deformación en las columnas que se muestra en la Figura10. Además, la Figura11 presenta las señales de posición y de aceleración de los pisos.

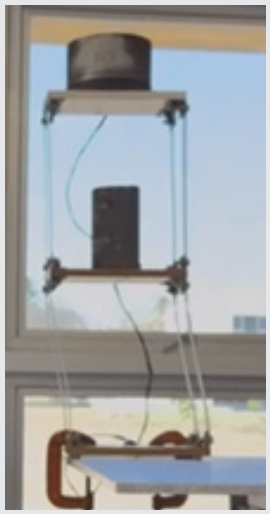


Figura 10. Deformación de las columnas del edificio a escala durante la prueba.
Fuente: Elaboración propia.

La estructura permite realizar pruebas con diferentes masas en el primer o segundo nivel. Al conocer la constante de rigidez de las columnas, así como sus dimensiones, se calculan las frecuencias naturales que tiene el edificio dependiendo de la masa que se le agregue.

Durante la prueba experimental se generó un archivo CSV para el almacenamiento de las lecturas obtenidas de aceleración y desplazamiento durante la prueba. Los valores de aceleración se muestran en la Figura 12 para el primer piso y en la figura 13 para el segundo piso.

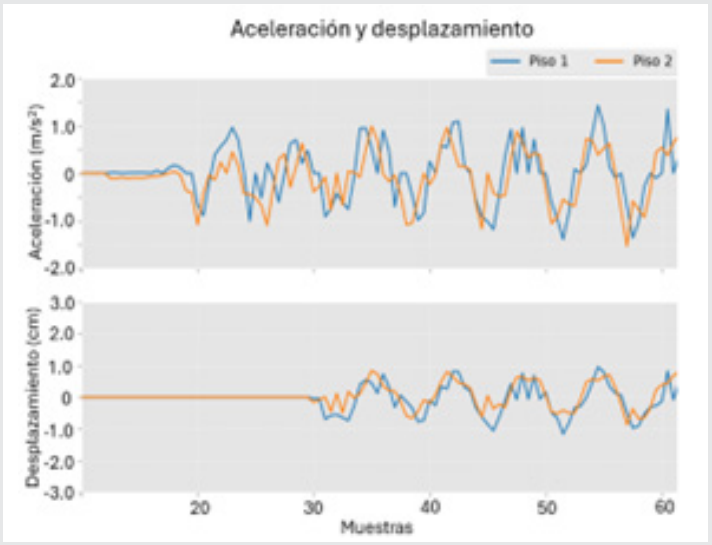


Figura 11. Gráficos en tiempo real de aceleración y desplazamiento en la Raspberry Pi 3.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Gráficos de aceleración del primer piso obtenido durante la prueba.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Gráficos de aceleración del segundo piso obtenido durante la prueba.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de las señales de aceleración registradas en el primer y segundo piso (almacenadas en el archivo CSV), se obtuvo su representación en frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Como se observa en las Figs. 14 y 15, los picos de amplitud son muy

cercanos a las frecuencias naturales calculadas en (9), indicando condiciones de resonancia. Adicionalmente, estos resultados validan la ecuación (15), ya que la máxima amplitud ocurre en la frecuencia del segundo modo. Este comportamiento se explica por la distribución de masas del edificio: al ser la masa del primer piso significativamente mayor (5.14 kg) que la del segundo (3.58 kg). Aunque ambos pisos tienen la misma rigidez, el segundo modo adquiere mayor participación dinámica.

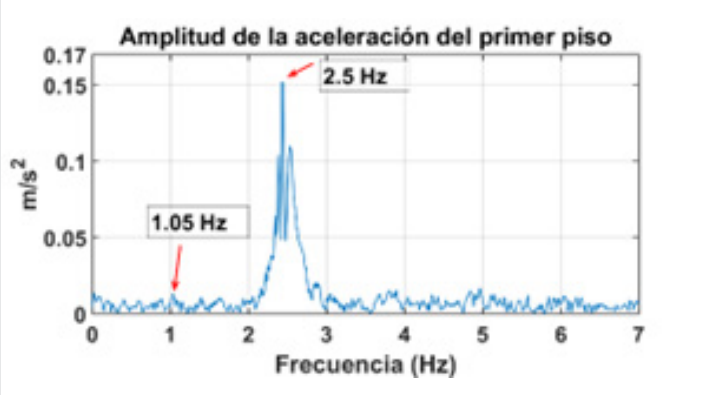


Figura 14. Transformada rápida de Fourier del primer piso obtenido durante la prueba.
Fuente: Elaboración propia.

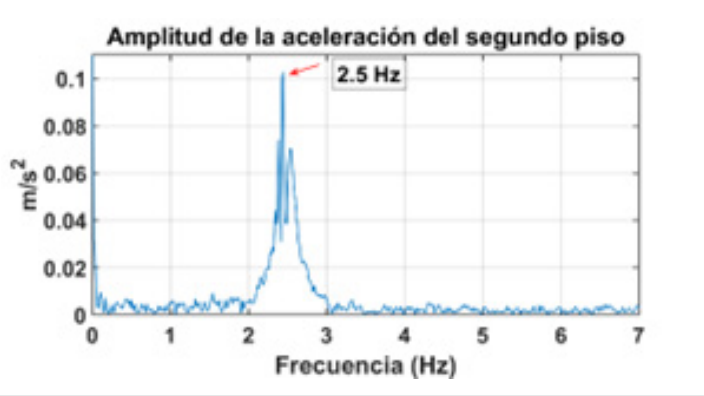


Figura 15. Transformada rápida de Fourier del segundo piso obtenido durante la prueba.
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos durante las pruebas son alentadores, ya que la respuesta de los sensores de aceleración y de posición fue la esperada para poder capturar con precisión los movimientos dinámicos del edificio propuesto de bajo costo, el cual permitió comparar los resultados teóricos con los experimentales. Esto hace posible emplearlo en cursos de ingeniería para validar la teoría de control de vibraciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen SECIHTI, PRODEP-SEP, y a la Universidad de Colima por el apoyo para la realización de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Romero S. (2024). Los 10 terremotos más impactantes del último siglo. Muy Interesante. Disponible en: https://www.muyinteresante.com/naturaleza/17089.html

[2] Espíndola V. H., y Campos, X. A. (2018) ¿Qué son los sismos, dónde ocurren y cómo se miden? Revista Ciencia, 69,(3), 45-52. [En línea]. Disponible en: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/69_3/PDF/QueSonSismos.pdf

[3] Concha, A., Garrido, R. y Álvarez-Icaza, L. (2016). Identification of shear buildings using an instrumental variable method and linear integral filters. Journal of Sound and Vibration, 385, 149-170. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.09.043

[4] Martínez, R. (2014). Control de estructuras en el espacio de estados. Ciudad de México. UNAM.

[5] UNAM. Laboratorio de control de vibraciones, Instituto de Ingeniería UNAM. Obtenida el 4 de septiembre de 2024, de la página electrónica: https://www.iingen.unam.mx/es- mx/Investigacion/Capacidades-Experimentales/Control-de-vibraciones/Paginas/default.aspx

[6] Guéguen, P., Michel, C. y Courboulex, D. G. (2021). Comparing Direct Observation of Torsion with Array-Derived Rotation Rates in a Reinforced Concrete Building. Sensors, 21(3), 985. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.3390/s21030985

[7] Kurzych, A., Kasprzyk, M., Kocierz, R., y Śliwka, J. (2016). The laboratory investigation of the innovative sensor for torsional effects in engineering structures' monitoring. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 6(5), 815–825. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/s13349-016-0181-3

[8] Halfacree, G., y Upton, E. (2016) Raspberry Pi User Guide (4ª ed.) Chichester: Wiley.

[9] Rodríguez, I., (2025). Edificio a escala excitado sísmicamente. [Video]. YouTube. [En línea]. Disponible en: https://youtu.be/ss0MkpJ8Xn0?si=64wm4y-NlNRgfGcz3.

Multidisciplinario
e
ingenierías
Ingeniantes

Pronóstico del Consumo de Energía Eléctrica en Edificio Inteligente

Colaboración
Yianko de Jesús Castellanos Pol Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Unidad Académica Tepic; Ansel Yoan Rodríguez González; Yoan Martínez López, Universidad de Córdova

Fecha de recepción: 17 de septiembre 2025
Fecha de aceptación: 17 de septiembre de 2025

RESUMEN: La optimización del consumo energético en edificios inteligentes es esencial para reducir el impacto ambiental y mejorar la eficiencia en el uso de recursos. En este trabajo se aborda la predicción del consumo eléctrico a partir de datos históricos obtenidos de la Competition on Electric Energy Consumption Forecast 2025. El estudio se organizó en cuatro etapas: recopilación de datos, preprocesamiento, normalización y experimentación con diferentes modelos de aprendizaje automático. Se evaluaron cuatro algoritmos representativos: Regresión Lineal, K-Nearest Neighbors (KNN), Random Forest y Máquinas de Soporte Vectorial (SVM). El rendimiento se midió utilizando métricas estándar como MSE, RMSE, MAE y R2. Los resultados muestran que Random Forest alcanzó el mejor desempeño, con un R2=0.88 y errores mínimos tras la normalización de los datos. Estos hallazgos confirman la efectividad de los métodos de ensamble para capturar patrones complejos de consumo y refuerzan su potencial como herramienta robusta para la gestión energética en tiempo real en edificios inteligentes.

PALABRAS CLAVE: predicción, energía, consumo, edificios inteligentes, aprendizaje automático.

ABSTRACT: The optimization of energy consumption in smart buildings is essential to reduce environmental impact and improve resource efficiency. This work addresses the prediction of electricity consumption using historical data from the Competition on Electric Energy Consumption Forecast 2025. The study was structured in four stages: data collection, preprocessing, normalization, and experimentation with different machine learning models. Four representative algorithms were evaluated: Linear Regression, K-Nearest Neighbors (KNN), Random Forest, and Support Vector Machines (SVM). Performance was assessed using standard metrics such as MSE, RMSE, MAE, and R2. The results show that Random Forest achieved the best performance, with an R2=0.88 and minimal errors after data normalization. These findings confirm the effectiveness of ensemble methods in capturing complex consumption patterns and highlight their potential as robust tools for real-time energy management in smart buildings.

KEYWORDS: forecasting, energy, consumption, smart buildings, machine learning.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la optimización del consumo energético en edificios inteligentes ha ganado relevancia, motivada por la necesidad de reducir el impacto ambiental y mejorar la eficiencia energética [1]. Esta importancia se refleja incluso en la creación de competencias internacionales, como la Competition on Electric Energy Consumption Forecast 2025 , que buscan promover el desarrollo de modelos precisos de predicción del consumo energético. Para ello, se han desarrollado modelos de forecasting como ARIMA, LSTM, redes neuronales profundas y modelos híbridos [2]. La pre-

dicción de la demanda energética resulta esencial para gestionar eficientemente los recursos, especialmente en sistemas que integran energías renovables, como la fotovoltaica [3], [4].

En este trabajo se exploran modelos clásicos como Regresión Lineal [5], K-Nearest Neighbors (KNN) [6], Random Forest [7] y Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) [8], debido a su interpretabilidad, menor complejidad computacional y capacidad de ofrecer resultados robustos con cantidades moderadas de datos históricos. Estos modelos permiten implementar soluciones efectivas y comprensibles para la predicción del consumo energético, sin requerir la infraestructura y los grandes volúmenes de datos que exigen las técnicas más complejas.

La investigación se estructura en diferentes fases que abarcan desde la recopilación y preparación de los datos hasta la evaluación experimental de los modelos seleccionados, con el propósito de determinar cuál ofrece un desempeño más adecuado en el contexto del edificio analizado.

MATERIAL Y MÉTODOS

El desarrollo del presente trabajo se organiza en cuatro etapas fundamentales: identificación del consumo energético y sus principales características, preprocesamiento de los datos, recopilación y análisis de los mismos y experimentación con diferentes modelos de predicción.

Conjunto de Datos

Los datos utilizados fueron obtenidos de la Competition on Electric Energy Consumption Forecast 20251. Esta base de datos se encuentra distribuida en cinco archivos CSV: uno con un año de registro, otro con 40 días y tres conjuntos correspondientes a tres días de consumo energético. Los archivos incluyen información de la temperatura exterior, condiciones climáticas y la energía generada por los paneles fotovoltaicos del edificio.

Cabe señalar que la documentación de la Competition on Electric Energy Consumption Forecast 2025 no incluye una descripción detallada del edificio, solo que se trata de un smart building con paneles fotovoltaicos y sensores ambientales. En consecuencia, el presente análisis se realiza considerando únicamente la información disponible en la base de datos pública y reconociendo esta limitación.

La Tabla 1 presenta los promedios de consumo, temperatura y generación fotovoltaica en los diferentes períodos analizados. Se observa que la demanda del edificio varía entre 1,560.17 y 2,076.67 kWh, mientras que la generación proveniente de los paneles fotovoltaicos fluctúa entre 236.19 y 714.74 kWh, cubriendo aproximadamente el 19% de la alimentación total del edificio. Los valores de temperatura se mantienen relativamente constantes.

Tabla 1. Promedio de consumos, temperatura y generación en diferentes períodos.

Ficheros	Consumos (kWh)	Temperatura (°C)	Generación (kW)
Año	1909.00	16.97	714.74
40 días	2076.67	12.51	257.76
Día 1	1656.38	13.74	240.35
Día 2	1560.17	14.62	238.24
Día 3	1722.67	15.23	236.19

Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 1 y 2 muestran las tendencias generales del consumo energético anual y de 40 días, evidenciando variaciones crecientes o decrecientes que reflejan cambios en la demanda a lo largo del tiempo. Estas fluctuaciones pueden estar asociadas a eventos estacionales o extraordinarios que alteran el patrón habitual de consumo.

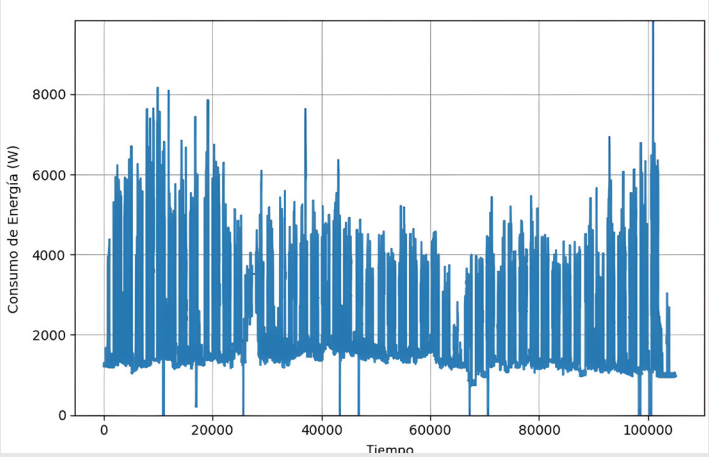


Figura 1. Consumo de Energía por día en un año.
Fuente: Elaboración propia.

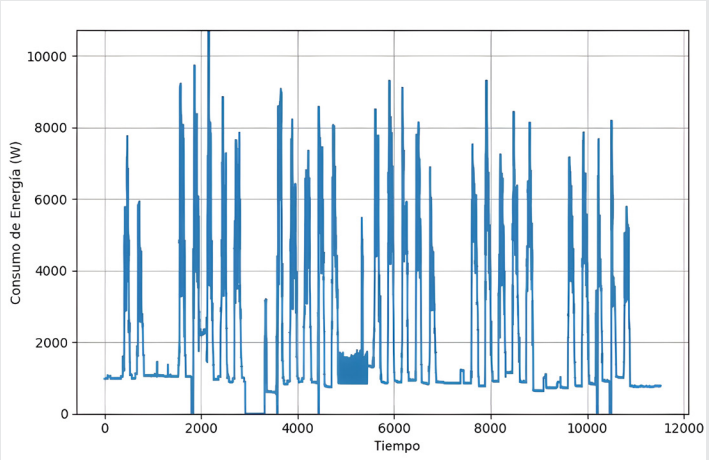


Figura 2. Consumo de Energía por día en 40 días.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3 presenta los consumos diarios para los días 1, 2 y 3, mostrando una variación relativamente baja entre días consecutivos.

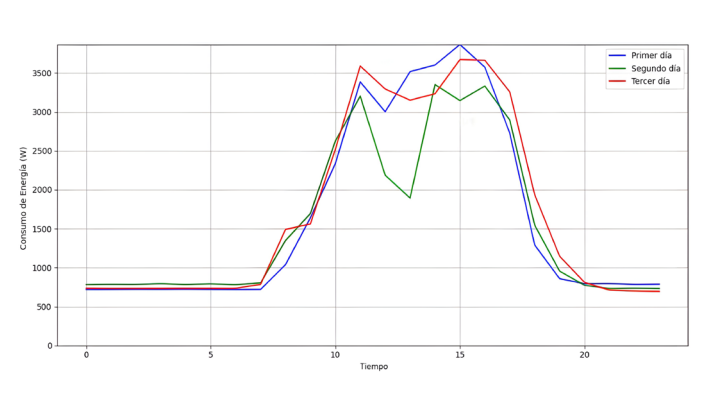


Figura 3. Consumo de Energía por días 1, 2 y 3.
Fuente: Elaboración propia.

Preprocesamiento de los Datos

El preprocesamiento consistió en reducir los datos del período anual, pasando de un muestreo cada 5 minutos a intervalos de 1 hora, calculando el consumo promedio por hora. Esta transformación permite simplificar el análisis y facilita la visualización e interpretación de patrones de consumo a diferentes escalas temporales.

Como paso opcional dentro del preprocesamiento, se aplicó normalización de las variables, con el objetivo de homogeneizar las escalas y mejorar la convergencia de algunos modelos de predicción sensibles a la magnitud de los datos, como KNN y SVM [9].

De esta forma, se obtuvieron dos conjuntos de datos:

- Conjunto original preprocesado: datos reducidos a intervalos de 1 hora sin normalización
- Conjunto normalizado: datos preprocesados con normalización aplicada a todas las variables.

En los experimentos, ambos conjuntos fueron utilizados.

Recopilación y Análisis de Datos

La experimentación se centró en evaluar el rendimiento de los modelos de predicción del consumo energético:

- Regresión Lineal [5]: modelo paramétrico que establece una relación lineal entre las variables predictoras y la variable objetivo mediante mínimos cuadrados.
- K-Nearest Neighbors (KNN) [6]: modelo no paramétrico que predice el valor de una instancia en función de los k vecinos más cercanos en el conjunto de entrenamiento.
- Random Forest [7]: ensamble de árboles de decisión que mejora la precisión y reduce el sobreajuste mediante votación promedio de múltiples árboles.
- Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) [8]: algoritmo supervisado que encuentra un hiperplano óptimo para separar o predecir los datos, maximizando el margen y utilizando funciones kernel para relaciones no lineales.

Se utilizaron las dos versiones del conjunto de datos: Conjunto original preprocesado y Conjunto normalizado. En cada modelo se emplearon procedimientos de ajuste y validación mediante división de los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba (80%-20%), con el objetivo de evaluar su capacidad de generalización. Los parámetros principales como el número de vecinos en KNN, la cantidad de árboles en Random Forest y los hiperparámetros C y γ en SVM, fueron determinados empíricamente a partir de pruebas iterativas para optimizar el rendimiento.
Para medir la precisión de los modelos se emplearon las siguientes métricas [10]:

Raíz del Error Cuadrático Medio ($RMSE$)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_m - P_c)^2}$$

Error Cuadrático Medio (MSE)

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_m - P_c)^2$$

Error Absoluto Medio (MAE)

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|P_m - P_c|$$

Coeficiente de Determinación ($R2$)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(P_m - P_c)^2}{\sum_{i=1}^{N}(P_m - \bar{P_c})^2}$$

RESULTADOS

La Tabla 2 muestra la comparación de las métricas de desempeño de los modelos evaluados, tanto para los datos originales como para los normalizados. Se observa que la normalización mejora significativamente los resultados en todos los casos, particularmente en KNN y Random Forest.

Regresión Lineal

Los resultados obtenidos mediante Regresión Lineal reflejan un rendimiento deficiente: el modelo presentó un $R2=-0.16$, lo que sugiere que no logra explicar la variabilidad de los datos. Además, las métricas de error fueron elevadas ($MSE = 1.13$, $RMSE = 1.16$ y $MAE = 0.98$), indicando que las predicciones se alejan considerablemente de los valores reales. Estos resultados ponen de manifiesto que, incluso tras la normalización, la Regresión Lineal no es adecuada para este problema de predicción (Tabla 2).

Tabla 2. Comparación de métricas entre métodos para conjunto original preprocesado y conjunto normalizado.

Método	Métrica	Conjunto original preprocesado	Conjunto normalizado
Regresión Lineal	MSE	637475.27	0.28
	RMSE	858.18	0.53
	MAE	689.81	0.40
	R^2	0.48	0.71
K-Nearest Neighbors	MSE	140373.31	0.12
	RMSE	374.66	0.35
	MAE	264.68	0.25
	R^2	0.90	0.88
Random Forest	MSE	1603928.13	1.13
	RMSE	1266.46	1.16
	MAE	1111.10	0.98
	R^2	-0.13	-0.16
Máquinas de Soporte Vectorial	MSE	2508191.02	1.70
	RMSE	1583.73	1.30
	MAE	1168.19	1.04
	R^2	-0.77	-0.74

Fuente: Elaboración propia.

K-Nearest Neighbors (KNN)

El modelo KNN se ajustó utilizando un valor de k=10. Los resultados muestran un desempeño moderado, con un coeficiente de determinación $R2$=0.71, lo que indica una capacidad limitada para explicar la variabilidad de los datos. Las métricas de error ($MSE = 0.28$, $RMSE = 0.53$ y $MAE = 0.40$) son relativamente altas, lo que refleja predicciones con errores considerables. Tanto el RMSE como el MAE confirman que el modelo presenta una precisión restringida. En general, el ajuste de parámetros permitió mejorar los resultados respecto al conjunto sin normalización, aunque el rendimiento sigue siendo modesto (Tabla 2).

Random Forest

El modelo se entrenó con 100 árboles de decisión. Los resultados (Tabla 2) muestran un desempeño sobresaliente, con un $R2$=0.88, lo que evidencia una alta capacidad explicativa de la variabilidad de los datos. Las métricas de error fueron bajas (MSE = 0.12, $RMSE$ = 0.35 y MAE = 0.25), confirmando que el modelo produce predicciones consistentes y precisas. La normalización de los datos contribuyó a reducir aún más los errores, consolidando a Random Forest como el modelo más robusto entre los evaluados.

Support Vector Machine (SVM)

En este trabajo SVM se configuró con C=100, γ=scale y ϵ=0.1. A pesar de ello, el modelo presentó un desempeño muy pobre, con $R2$=−0.74, lo que evidencia que no logra capturar la variabilidad de los datos. Asimismo, las métricas de error fueron elevadas (MSE = 1.70, $RMSE$ = 1.30 y MAE = 1.04), lo que confirma que las predicciones difieren significativamente de los valores reales.

Gráfica de Ajuste

La Figura 4 muestra la relación entre los valores reales de consumo energético (kWh) y los valores predichos por el método Random Forest. Se observa un alto grado de correspondencia entre ambas series, lo que indica que el modelo logró capturar de manera adecuada las tendencias y patrones presentes en los datos.

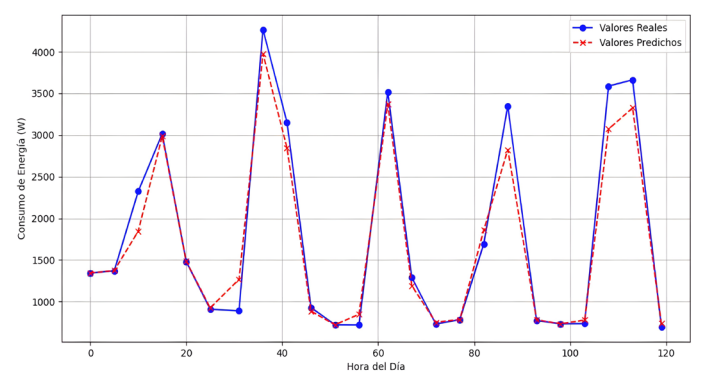


Figura 4. Comparación entre consumos reales y predichos mediante Random Forest.
Fuente: Elaboración propia.

En particular, Random Forest, al estar basado en múltiples árboles de decisión, demuestra una capacidad superior para modelar relaciones complejas entre las variables. Esta característica lo convierte en una herramienta adecuada para la optimización de la gestión del consumo energético en tiempo real y para apoyar la toma de decisiones estratégicas.

Discusión de resultados

Los resultados obtenidos evidencian diferencias notables en el desempeño de los modelos evaluados. En particular, Random Forest presentó un ajuste significativamente superior frente a los demás algoritmos, alcanzando un $R2$=0.88 y un MSE = 0.12 en el conjunto normalizado, lo que confirma su capacidad para capturar la variabilidad del consumo energético en el edificio analizado. Estos resultados refuerzan la idoneidad de los métodos basados en ensambles en problemas de predicción de series temporales con múltiples variables y relaciones no lineales. Asimismo, la normalización de los datos resultó ser un factor determinante, mejorando el rendimiento de modelos sensibles a la escala, como KNN y SVM, y optimizando también los resultados de Random Forest. En contraste, la Regresión Lineal y las Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) mostraron un desempeño deficiente, incluso después de aplicar normalización, lo que pone de manifiesto sus limitaciones para capturar patrones de consumo caracterizados por alta variabilidad y no linealidad. Finalmente, cabe señalar que, si bien no se evaluaron técnicas de aprendizaje profundo como LSTM

o CNN-LSTM, los resultados alcanzados sugieren que los modelos clásicos bien configurados ofrecen un balance favorable entre precisión, interpretabilidad y eficiencia computacional, especialmente en escenarios con bases de datos de tamaño intermedio.

En términos prácticos, la comparación de algoritmos realizada en este estudio aporta una referencia útil para investigadores y profesionales que buscan seleccionar técnicas de aprendizaje automático adecuadas a distintos escenarios de consumo energético, favoreciendo el desarrollo de soluciones escalables y sostenibles para la gestión inteligente de la energía.

CONCLUSIONES

En este trabajo se demostró que Random Forest constituye el modelo más efectivo para la predicción del consumo energético en edificios inteligentes, superando en rendimiento a KNN, Regresión Lineal y SVM, gracias a su capacidad para modelar relaciones complejas y no lineales entre las variables. Los experimentos confirmaron que la normalización de datos es un paso fundamental en el preprocesamiento, pues mejora el desempeño de los algoritmos sensibles a la escala y contribuye a reducir los errores de predicción. Por el contrario, los modelos lineales y de márgenes presentaron un rendimiento limitado, al no capturar adecuadamente la complejidad de los patrones de consumo.

En conjunto, los resultados obtenidos consolidan la utilidad de los métodos basados en ensambles como herramientas robustas, precisas y eficientes para la gestión del consumo energético en tiempo real, y plantean la necesidad de explorar en futuros trabajos la integración de técnicas de aprendizaje profundo e híbrido que combinen precisión, escalabilidad y aplicabilidad en entornos reales de edificios inteligentes. Además, los resultados obtenidos proporcionan una base comparativa útil para investigadores interesados en el modelado energético, facilitando la validación de nuevos enfoques y la reproducción de estudios en distintos contextos de edificios inteligentes.

BIBLIOGRAFÍA

[1] H. P. Das, Y.-W. Lin, U. Agwan, L. Spangher, A. Devonport, Y. Yang, J. Drgona, S. Schiavon, and C. J. Spanos, "Machine Learning for Smart and Energy-Efficient Buildings," arXiv preprint arXiv:2211.14889, 2022.

[2] T. Hong, P. Pinson, Y. Wang, R. Weron, D. Yang, and H. Zareipour, "Energy forecasting: A review and outlook," IEEE Open Access Journal of Power and Energy, vol. 7, pp. 376–388, 2020.

[3] H. Yin, M. O'Neill, M. Hossain, and Y. Liu, "A comprehensive review of neural networks for building energy consumption forecasting," Sustainability, vol. 16, no. 17, p. 7805, 2024.

[4] H. Wang, Z. Lei, X. Zhang, B. Zhou, and J. Peng, "A review of deep learning for renewable energy forecasting," Energy Conversion and Management, vol. 198, p. 111799, Oct. 2019.

[5] H. Yang, M. Ran, and C. Zhuang, "Prediction of building electricity consumption based on Joinpoint–multiple linear regression," Energies, vol. 15, no. 22, p. 8543, 2022

[6] G. Hong, G.-S. Choi, J.-Y. Eum, H. S. Lee, and D. D. Kim, "The hourly energy consumption prediction by KNN for buildings in community buildings," Buildings, vol. 12, no. 10, p. 1636, 2022,

[7] C. B. Pop, V. R. Chifu, C. Cordea, E. S. Chifu, and O. Barsan, "Forecasting the short-term energy consumption using random forests and gradient boosting," Energy Reports, vol. 8, pp. 1–10, 2022,.

[8] Z. Meng, X. Zhang, and Y. Wang, "Forecasting energy consumption based on support vector regression and Markov chain," Frontiers in Environmental Science, vol. 10, p. 883711, 2022,.

[9] S. B. Kotsiantis, D. Kanellopoulos, and P. E. Pintelas, "Data preprocessing for supervised learning," International Journal of Computer Science, vol. 1, no. 2, pp. 111–117, 2006.

[10] T. Chai and R. R. Draxler, "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature," Geosci. Model Dev., vol. 7, no. 3, pp. 1247–1250, 2014

Ciencias de la Computación

Ingeniantes

Sistema IoT-MQTT para la monitorización y notificación de alertas microclimáticas en cultivos agrícolas

Colaboración
Carlos Eduardo Rincón García, Patricia Elizabeth Figueroa Millán, Ismael Amezcua Valdovinos, Ramona Evelia Chávez Valdez; J. Reyes Benavides Delgado, Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán

Fecha de recepción: 25 de septiembre 2025
Fecha de aceptación: 28 de septiembre de 2025

RESUMEN: En México, la producción de limón alcanzó 3.2 millones de toneladas en 2023, lo que representó un incremento del 4.5 % respecto al año anterior. Esta cifra posiciona al país como el segundo productor y exportador de limón a nivel mundial. Sin embargo, el cultivo es altamente sensible a variaciones microclimáticas que pueden comprometer su productividad. En este contexto, se desarrolló un sistema inteligente capaz de monitorear variables ambientales en tiempo real y generar alertas ante condiciones críticas que afectan al cultivo. El sistema, basado en una arquitectura IoT con comunicación MQTT, recopila datos desde una estación meteorológica, los analiza mediante un filtro de Kalman y detecta eventos como valores atípicos, cambios abruptos o fallas de comunicación. Las alertas generadas se notifican al productor por SMS y se visualizan en una plataforma web diseñada para apoyar la toma de decisiones agronómicas de forma precisa y oportuna.

PALABRAS CLAVE: alertas microclimáticas, cultivos agrícolas, IoT, monitorización, MQTT.

ABSTRACT: In Mexico, lemon production reached 3.2 million tons in 2023, reflecting a 4.5% increase compared to the previous year. This figure places the country as the second largest producer and export of lemons worldwide. However, lemon crops are highly sensitive to microclimatic variations which can compromise its productivity. In this context, an intelligent system was developed capable of monitoring environmental variables in real time and generating alerts when critical conditions affect the crop. The system, based on an IoT architecture with MQTT communication, collects data from a weather station, analyzes it using a Kalman filter, and detects events such as outliers, abrupt changes, or communication failures. The generated alerts are notified to the producer via SMS and displayed on a web platform designed to support accurate and timely agronomic decision-making.

KEYWORDS: Microclimatic alerts, agricultural crops, IoT, monitoring, MQTT.

INTRODUCCIÓN

La agricultura, base de la economía y la seguridad alimentaria global, aportó 4.3 % del PIB mundial en 2022 y creció 2.6 % en 2023 [1]. En México, solo el 26 % de la superficie agrícola cuenta con riego, mientras que el 74 % restante, de temporal, se encuentra altamente expuesta a variaciones climáticas. En consecuencia, el 61 % de las unidades de producción registró pérdidas por factores climáticos o biológicos [2], y al 15 de agosto de 2024, el 34.7 % del territorio nacional presentaba sequía de moderada a excepcional [3]. En el cultivo de limón, el Gobierno Federal repor-

tó una disminución del rendimiento de 8.03 a 7.82 t/ha entre 2023 y 2024 [4]. En el estado de Colima, el limón es el cultivo perenne líder, con 22 651 ha y una producción de 231 843 t según el censo 2022 [5].

El impacto climático en la agricultura mexicana es evidente, sobre todo en los cultivos de temporal y cítricos. Las sequías prolongadas y las altas temperaturas han reducido la productividad de granos básicos como maíz y frijol [6], mientras que el cambio climático altera los patrones de lluvia y provoca pérdidas económicas significativas [7]. En el caso del limón, la producción nacional registró una caída cercana al 5 % en el ciclo 2023/2024, atribuida a la sequía y temperaturas extremas [8]. Dichas variaciones climáticas inciden directamente en los procesos fisiológicos del limón: la inducción floral se estimula con temperaturas frescas y déficit hídrico previo a la brotación, mientras que las altas temperaturas prolongadas afectan la floración y el cuajado, reduciendo el amarre de fruto [9]. En regiones del Pacífico mexicano, como Tecomán, Colima, la temperatura mínima y máxima regula el crecimiento y desarrollo del fruto [10]. Asimismo, la alta humedad y las noches húmedas tras el inicio de lluvias favorecen la aparición de Alternaria (mancha parda) [11],[12], mientras que los ambientes cálidos y secos incrementan la incidencia del ácaro rojo (Panonychus citri), plaga de relevancia regional [13]. El déficit hídrico del suelo durante la floración y el cuajado incrementa la abscisión y reduce el calibre y rendimiento del fruto; sin embargo, estudios en limón 'Fino' demuestran que el riego deficitario regulado (RDI) puede optimizar el uso del agua sin afectar la producción si se aplica fuera de las etapas críticas [14]. Por su parte, las rachas y vientos secos provocan la caída de flores y frutos y daños por roce en la cáscara, por lo que se recomienda el uso de cortinas rompevientos, especialmente cuando coinciden con altas temperaturas o sequía [15], [16]. Un desarrollo agrícola sólido es esencial para reducir la pobreza y garantizar la alimentación de una población mundial en crecimiento hacia 2050 [17]. Sin embargo, los métodos agrícolas tradicionales por sí solos no bastan, lo que ha impulsado una transformación digital del sector [18]. En México, la adopción de tecnologías digitales en las parcelas sigue siendo un reto; por ello, el Gobierno Federal promueve indicadores para acelerar la transferencia tecnológica y su adopción por los productores, esfuerzo reforzado por las iniciativas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), orientadas a medir y detonar la adopción tecnológica ante el cambio climático [19].

En este contexto, la agricultura experimenta una transformación digital acelerada bajo el paradigma de la Agricultura 4.0, impulsada principalmente por la adopción del Internet de las Cosas (IoT). El IoT se define como una red de dispositivos físicos, sensores y actuadores interconectados que recopilan, envían y analizan datos en tiempo real a través de internet, permitiendo una toma de decisiones basada en información precisa en lugar de métodos empíricos tradicionales [20].

Durante la última década, diversos estudios han demostrado el potencial del IoT para revolucionar la gestión agrícola mediante la monitorización ambiental en tiempo real. Por ejemplo, [21] presenta una plataforma IoT de bajo costo y código abierto con control de actuadores y notificaciones casi en tiempo real; [22] y [23] implementaron sistemas similares en huertos urbanos e hidropónicos; mientras que [24] desarrolló una red de sensores IoT para invernaderos, mejorando la eficiencia y las decisiones productivas. En conjunto, la literatura y organismos internacionales coinciden en que el IoT constituye un pilar clave para incrementar la productividad agrícola de manera sostenible [25]. La integración de sensores de suelo y clima con plataformas digitales permite el monitoreo continuo del microclima (temperatura, humedad, velocidad del viento, entre otros). Diversos estudios demuestran que esta vigilancia constante optimiza el uso de agua e insumos y favorece respuestas oportunas a las condiciones ambientales, incrementando la eficiencia y productividad de los cultivos [22],[23]. Además, la comunicación inalámbrica de estos sensores se implementa mediante protocolos ligeros como MQTT, bajo una arquitectura publicista–suscriptor que asegura una transmisión fiable y de baja latencia, incluso en dispositivos con recursos limitados [26]. En conjunto, la evidencia respalda que el IoT y los protocolos de telemetría como MQTT constituyen la base de la agricultura inteligente para el monitoreo ambiental y la generación de alertas en tiempo real. No obstante, persiste una brecha significativa en la adopción de tecnologías digitales dentro del sector agrícola. A pesar de los avances, gran parte de los productores aún opera bajo esquemas tradicionales con monitoreo limitado, sin vigilancia en tiempo real de variables microclimáticas críticas como temperatura, humedad o velocidad del viento, lo que dificulta la respuesta oportuna ante cambios del entorno. Las decisiones de riego, fertilización y control de plagas continúan basándose en observaciones empíricas, sin datos actualizados, lo que deriva en una gestión ineficiente de recursos y respuestas tardías ante condiciones adversas [27].

Este contexto evidencia una brecha operativa y tecnológica: la limitada adopción de soluciones de monitoreo y alertas en tiempo real a nivel de cultivo. Los indicadores nacionales, las condiciones climáticas y la literatura revisada confirman esta brecha y respaldan la necesidad de evolucionar hacia sistemas agrícolas basados en datos. En respuesta, el presente trabajo propone un sistema IoT-MQTT para la monitorización y notificación automática de variables microclimáticas en cultivos de limón, mediante una red de sensores de bajo costo que registra en tiempo real temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y velocidad del viento, transmitiendo los datos a un bróker MQTT. A diferencia de enfoques previos, el sistema integra alertas automatizadas

cuando una variable excede los umbrales definidos, enviando notificaciones inmediatas a un cliente web supervisado por los responsables del cultivo.

En el caso del limón mexicano, cultivo estratégico para Colima, esta necesidad ha sido señalada por el Consejo Estatal de Productores de Limón (COEPLIM), ante las pérdidas derivadas de sequías, vientos cálidos y plagas favorecidas por dichas condiciones. La implementación busca promover acciones preventivas sistemáticas en lugar de correctivas, justificando así el desarrollo de un sistema IoT-MQTT con alertas microclimáticas, capaz de proporcionar información precisa y oportuna que fortalezca la resiliencia productiva del sector citrícola regional.

Revisión de la literatura

A continuación, se presenta un análisis de trabajos relacionados con el monitoreo de variables climáticas mediante IoT y protocolos como MQTT.

En [28] se evaluó un sistema inteligente de riego en plantaciones de limón, que combinó IoT y un sistema de apoyo a decisiones (DSS) para optimizar el riego a partir de datos de temperatura y humedad; sin embargo, su arquitectura dependía de conectividad móvil y presentó baja escalabilidad al operar con un solo nodo. En [29] se desarrolló un sistema IoT autónomo con sensores de pH, humedad y temperatura del suelo, transmisión vía ESP8266 y energía solar, cuyos datos se visualizaron en ThingSpeak; aunque funcional, carecía de análisis de anomalías, alertas y cobertura amplia.

Por su parte en [30] se propuso un sistema de riego inteligente con IoT, LoRa y Edge Computing, empleando la ecuación de Penman–Monteith y monitoreo vía MQTT; pese a su escalabilidad, no incluyó alertas ante eventos climáticos ni visualización histórica.

En [31] se presentó un sistema IoT con sensores multiparámetro y una aplicación basada en IA (Plantix) para recomendaciones agronómicas, aunque limitado a un solo cultivo (arroz) y dependiente de Wi-Fi.

Finalmente, en [32] se diseñó una plataforma de riego con IoT y LoRaWAN aplicada a olivares, logrando reducir el consumo de agua, pero sin incorporar sensores climáticos, detección de fallos o alertas automatizadas. A partir de las limitaciones identificadas en la literatura, la presente investigación propone un sistema de monitoreo y notificación de alertas microclimáticas que mejora la precisión, autonomía y capacidad de respuesta frente a condiciones críticas en cultivos agrícolas. A diferencia de estudios anteriores, el sistema integra sensores, análisis con filtro de Kalman unidimensional que se describe en la siguiente sección y un mecanismo de alertas en tiempo cuasi real por MQTT y SMS, cubriendo fallas de comunicación, valores fuera de rango y valores atípicos. Además, incorpora un cliente web con visualización por periodos del día, historial de alertas y generación de reportes, aportando una solución escalable, adaptable y centrada en la toma de decisiones informadas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Como caso de estudio del presente trabajo se consideró al Consejo Estatal de Productores de Limón (COEPLIM), ubicado en Tecomán, Colima, México, organismo que agrupa a productores citrícolas y colabora con instituciones de investigación para la transferencia de tecnología agrícola orientada a mejorar la productividad mediante prácticas innovadoras [33]; acorde con el cual y dada la influencia de las condiciones microclimáticas en el desarrollo de los cítricos, se identificó la necesidad de un sistema de monitoreo y alertas que apoye la toma de decisiones oportunas en el manejo del cultivo. La investigación se enmarca en el enfoque de investigación tecnológica propuesto por [34], orientado a la creación o mejora de sistemas y procesos, que sigue seis fases secuenciales:

- Planteamiento del estudio, donde se definieron el problema, objetivos y justificación;
- Marco teórico, que integró antecedentes y bases conceptuales;
- Hipótesis, con soluciones tentativas al problema planteado;
- Metodología, que estableció el plan de diseño y recursos;
- Implementación, correspondiente a la construcción y ejecución del sistema; y
- Evaluación, enfocada en la validación del prototipo y la comprobación de la hipótesis mediante resultados funcionales.

Para la fase de diseño e implementación del sistema, se adoptó el modelo de desarrollo en espiral propuesto en [35], por su carácter iterativo, su capacidad de gestionar riesgos tempranos y su flexibilidad para integrar mejoras progresivas. Este enfoque estructuró el desarrollo en cinco iteraciones que abarcaron planificación, análisis, prototipado, verificación y evaluación acumulativa.

En la fase inicial se definieron los objetivos, variables a medir y restricciones técnicas del sistema, identificando como necesidad principal el fortalecimiento del monitoreo microclimático en plantaciones de limón y la generación oportuna de alertas para la toma de decisiones agronómicas. Se realizó un análisis de riesgos que contempló posibles fallas de comunicación, errores de transmisión, ruido en las señales y pérdida de sincronización entre módulos, estableciendo como medidas correctivas la aplicación de un filtro de Kalman unidimensional y la implementación de alertas ante fallas de comunicación.

El filtro de Kalman es un algoritmo recursivo que estima el estado del sistema a partir de una secuencia de me-

diciones. Su objetivo es generar estimaciones óptimas de un proceso modelizado a partir de datos derivados de mediciones de procesos ruidosos Gaussianos [36]. El modelo dinámico del filtro de Kalman unidimensional viene definido por la ecuación de estado o transición (1, 2) y la ecuación de medición (3, 4, 5):

$$xt+1 = Axt + But \quad \text{Ec. (1)}$$

$$Pt+1 = Pt + Q \quad \text{Ec. (2)}$$

$$K = \frac{P_t}{(P_t+R)} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$xt = xt-1 + K(zt - xt-1) \quad \text{Ec. (4)}$$

$$P_t = (1 - K)P_t \quad \text{Ec. (5)}$$

En la etapa de ecuación de estado o transición, obtenemos una medición con ruido (1) y actualizamos el error de covarianza (2). Los parámetros de ruido y covarianza vienen dados por la sensibilidad del sensor DHT22 utilizado en el prototipo. Para la humedad se tiene margen de error de ±5%, mientras que para la temperatura es de ±0.2°C. Por lo tanto, la covarianza de cada una de las mediciones es 25 para la humedad y 0.04 para temperatura respectivamente.

Por otro lado, la etapa de medición actualiza la ganancia de Kalman (3), se realiza la actualización del estado tomando en cuenta la ganancia de Kalman, la medición actual z_t y el estado anterior x_{t-1} (4), y por último se actualiza la covarianza del sistema (5).

El filtro de Kalman es utilizado para evitar el envío de notificaciones cuando mediciones atípicas suceden en el sistema. Por ejemplo, La siguiente figura muestra el comportamiento inicial del sensor de temperatura antes de aplicar un estímulo, reflejando lecturas estables y sin variaciones significativas en las mediciones.

```
Datos sin filtrar:  {
  temperature: "31.24",
  atmPressure: "1008.74",
  relHumidity: "60.35",
  windSpeed: "2.12",
  soilMoisture: "8.77"
}
Datos filtrados:  {
  temperature: "31.23",
  atmPressure: "1008.59",
  relHumidity: "60.95",
  windSpeed: "2.13",
  soilMoisture: "8.77"
}
```

Figura 1. Medición de temperatura antes del estímulo.
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se aplicó un estímulo térmico controlado sobre el sensor para evaluar su respuesta. Como se observa en la siguiente figura, la temperatura ambiental se incrementó abruptamente tras la aplicación del estímulo, evidenciando la sensibilidad del sensor y el impacto de una perturbación directa en la variable física.

```
Datos sin filtrar:  {
  temperature: "35.57",
  atmPressure: "1008.74",
  relHumidity: "56.14",
  windSpeed: "2.08",
  soilMoisture: "8.77"
}
Datos filtrados:  {
  temperature: "34.39",
  atmPressure: "1008.72",
  relHumidity: "57.60",
  windSpeed: "2.11",
  soilMoisture: "8.77"
}
```

Figura 2. Medición de la temperatura durante el estímulo.
Fuente: Elaboración propia.

Para estabilizar las lecturas, se aplicó el filtro de Kalman unidimensional, cuyo propósito es suavizar las mediciones entrantes mediante la estimación basada en observaciones previas.

Este procedimiento permite reducir la variabilidad provocada por el ruido y distinguir incrementos reales en la variable medida respecto a fluctuaciones espurias.

En la siguiente figura se observa la respuesta del sistema después de aplicar el filtro, donde los datos se presentan más estables y coherentes con el comportamiento esperado.

```
Datos sin filtrar:  {
  temperature: "39.56",
  atmPressure: "1008.74",
  relHumidity: "57.87",
  windSpeed: "2.33",
  soilMoisture: "8.77"
}
Datos filtrados:  {
  temperature: "39.43",
  atmPressure: "1008.74",
  relHumidity: "57.64",
  windSpeed: "2.31",
  soilMoisture: "8.77"
}
```

Figura 3. Medición de temperatura después del suavizamiento de los datos con filtro de Kalman.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la comparación entre los datos sin filtrar y filtrados se muestra en la Figura 4. Se aprecia que el

filtro de Kalman amortigua las desviaciones bruscas y suaviza las variaciones rápidas causadas por ruido, evitando posibles alertas falsas y mejorando la fiabilidad del monitoreo microclimático del sistema IoT-MQTT.

Este comportamiento confirma la eficacia del algoritmo para mantener la coherencia de las lecturas y la estabilidad del sistema bajo condiciones de estímulo directo.

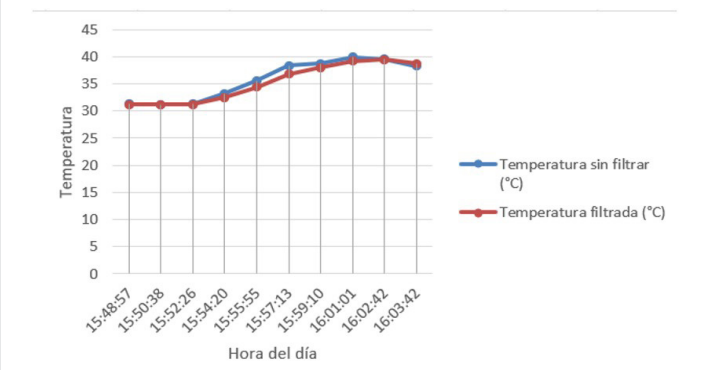


Figura 4. Gráfica de comportamiento del filtro de Kalman ante estímulo directo en el sensor de temperatura.
Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, el desarrollo técnico se estructuró en cinco iteraciones consecutivas:

Iteración 1. Construcción del primer prototipo funcional de la estación meteorológica con sensores y datalogger integrado. Se configuró la publicación de datos en formato JSON mediante MQTT y se desarrolló una versión inicial del cliente web conectada a una base de datos Supabase a través de una Raspberry Pi actuando como suscriptor.

Iteración 2. Mejora de la conectividad y gestión de datos, incorporando soporte Wi-Fi/GSM y un mecanismo inicial de notificaciones por MQTT y SMS. El cliente web integró la visualización del historial de alertas.

Iteración 3. Implementación del filtro de Kalman para suavizar lecturas y reducir ruido. Se optimizó la interfaz del cliente web, mejorando la visualización y las notificaciones en tiempo real.

Iteración 4. Consolidación de funcionalidades mediante la clasificación de alertas (valores fuera de rango, lecturas atípicas y fallas de comunicación) y ajuste de umbrales. Se fortaleció el cliente web con reportes, navegación histórica y pruebas continuas en campo.

Iteración 5. Incorporación de autenticación de usuarios y despliegue del sistema en producción (Vercel), habilitando el acceso remoto seguro y consolidando su operación como plataforma funcional para el COEPLIM.

Finalizadas las iteraciones, se avanzó a las fases de verificación, integración y pruebas funcionales, donde se evaluó la estabilidad del sistema, la precisión del análisis de datos y la eficiencia en la entrega de alertas en tiempo real. Los resultados permitieron validar su aplicabilidad en campo y su contribución al manejo agronómico del cultivo.

Alcance experimental

El diseño experimental del estudio se enfocó en la validación funcional del sistema IoT-MQTT en condiciones reales experimentales, pero aún no operativas de cultivo, con el objetivo de comprobar la estabilidad operativa, la integridad de la comunicación y la generación oportuna de alertas ante variaciones inducidas mediante estímulos físicos. En esta fase se evaluó la coherencia y fiabilidad del sistema, alcanzando un nivel de madurez tecnológica TRL-5, y se definió que la comparación con observaciones manuales se realizará como parte del trabajo futuro. Las lecturas de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y velocidad del viento se contrastaron con umbrales agronómicos de referencia documentados en la literatura (ver Introducción), validando el comportamiento esperado del sistema y delimitando su alcance tecnológico actual.

Arquitectura del sistema

En la Figura 5 se presenta el modelo conceptual del sistema, que describe la interacción entre sus componentes y el flujo de datos desde la adquisición de variables microclimáticas hasta la generación de alertas al usuario final.

El sistema se diseñó bajo una arquitectura publicista-suscriptor basado en IoT y MQTT, para garantizar la recolección precisa, el análisis en tiempo real y la notificación oportuna de alertas.

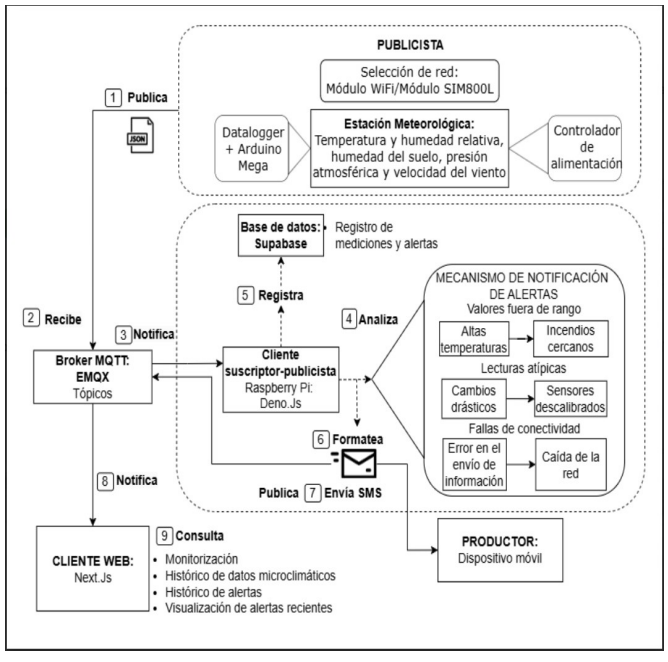


Figura 5. Arquitectura del sistema IoT.
Fuente: elaboración propia.

La estación meteorológica, con sensores de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, presión atmosférica y velocidad del viento conectados a un Arduino Mega, estructura las lecturas en JSON y las transmite vía Wi-Fi o SIM800L hacia un broker MQTT (EMQX), publicando los datos (1) en un tópico de sensado. El broker recibe (2) y distribuye (3) los mensajes a los suscriptores.

Una Raspberry Pi, programada en Deno.js, actúa como suscriptor, recibiendo los datos en tiempo real (3) y procesándolos (4) mediante un filtro de Kalman, que reduce el ruido y mejora la detección de eventos críticos. Posteriormente, el sistema compara los valores con umbrales preestablecidos y genera alertas clasificadas en tres tipos: valores fuera de rango, lecturas atípicas y fallas de conectividad.

Las lecturas y alertas se registran (5) automáticamente en una base de datos en la nube (Supabase), conformando un historial para análisis posterior. Las alertas se formatean (6) y publican (7) en un tópico MQTT exclusivo de notificaciones, permitiendo una suscripción diferenciada. De forma redundante, el sistema envía SMS al productor, asegurando la recepción aun con conectividad limitada. El broker reenvía las alertas (8) al cliente web.

El cliente web, desarrollado en Next.js, se suscribe al tópico de alertas y consulta (9) la base de datos para mostrar datos actuales e históricos. Su interfaz permite monitorear variables por periodos del día, visualizar notificaciones en tiempo real y generar reportes técnicos a partir de los registros almacenados.

Es importante destacar que la solución IoT descrita se apoya en la incorporación adicional de comunicación Wi-Fi considerando las condiciones típicas de campos agrícolas tecnificados y no tecnificados. La Tabla 1 presenta una comparación técnica de distintas tecnologías de comunicación igualmente viables para estos entornos, siempre que su selección se base en la infraestructura disponible.

Tabla 1: Comparativa de protocolos de comunicación inalámbrica.

Tabla 1. Fuentes de datos y herramientas utilizadas.

Fuente	Descripción	Propósito
NOAA GOES-R	Imágenes satelitales multiespectrales	Vigilancia atmosférica y oceánica
NOMADS	Modelos numéricos GFS	Análisis sinóptico y predicciones
Python + Satpy y Metpy	Procesamiento de imágenes satelitales	Generación de productos visuales
Django	Framework web backend	Interfaz de visualización PWA
React.js	Framework frontend	Interfaz de visualización de la PWA
PosgreSQL	Base de datos opcional	Almacenamiento de productos

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, Wi-Fi ofrece un bajo costo operativo cuando existe infraestructura disponible, razón por la cual se seleccionó para el caso de estudio. Aunque su consumo energético es elevado, se compensa mediante paneles solares que otorgan autonomía a la estación meteorológica y permiten un despliegue sencillo frente a otras tecnologías. Por su parte, la Tabla 2 muestra protocolos de aplicación alternativos; no obstante, se emplea MQTT por su eficiencia y escalabilidad, cualidades que fortalecen la arquitectura del sistema propuesto.

Tabla 2: Comparativa de protocolos de la capa de aplicación.

Criterio	MQTT [41]	CoAP [42]	HTTP [43]
Arquitectura	Publicista-suscriptor	Cliente-servidor Opción observe en GET	Cliente-servidor
Transporte	TCP	UDP	TCP
Escalabilidad	Alta - brokers con agrupamiento y balanceo, separación clara de roles	Media - para redes ligeras sin broker	Baja – dependencia de arquitectura de servidores HTTP
Integración de hardware	Alta – solo implementación de cliente MQTT y apuntar al bróker	Media – cada dispositivo requiere gestionar sus propios endpoints observe	Baja – cada nodo necesita configuración de endpoint y pila HTTP limitando despliegues masivos
Acceso a recursos	Tópicos jerárquicos (sensores/1)	URI de recurso (/sensor)	URI de recurso (/sensores)
Garantía de entrega	QoS 0,1 y 2 + garantías de TCP	CON/ACK	Garantías de TCP
Persistencia	Retención de mensajes/QoS persistente	No retiene notificaciones	Caché HTTP (opcional)
Overhead de cabecera	2 bytes	4 bytes	> 100 bytes
Consumo energético	Medio (keep alive + pub/sub)	Bajo	Alto (stateless + verboso)
Despliegue	Alto (brokers open source)	Medio (DTLS, menos librerías)	Muy alto (nativo web)

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Los resultados del sistema IoT-MQTT se enfocaron en la validación funcional y operativa del sistema para comprobar su viabilidad y estabilidad en condiciones experimentales reales, abarcando la recolección, procesamiento, transmisión y notificación de alertas microclimáticas. En esta fase, el estudio no contempló comparaciones con métodos tradicionales, dado que su alcance experimental (TRL-5) se centró en evaluar el desempeño tecnológico y la coherencia de los registros en tiempo real, más que en establecer métricas de precisión frente a observaciones manuales. Los resultados se agrupan en tres componentes:1) Funcionamiento del sistema, basado en una arquitectura publicista–suscriptor, donde la estación meteorológica envía en tiempo real las variables microclimáticas; 2) Procesamiento y validación de datos en la Raspberry Pi, que registra información en Supabase, aplica un filtro de Kalman para reducir ruido y clasificar alertas, y

gestiona las notificaciones por SMS y MQTT mediante Twilio; 3) Visualización web, que presenta un tablero de indicadores y gráficos por variable, permitiendo interpretar tendencias y tomar decisiones con base en la información procesada.

La estación meteorológica envía en tiempo real las variables microclimáticas, registradas en tres periodos: mañana (7:00–8:00 h), tarde (14:00–15:00 h) y noche (19:00–20:00 h). Para garantizar la transmisión, se implementó un script de selección de red que detecta automáticamente la disponibilidad de Wi-Fi o red celular, evitando pérdida de información. Además, el sistema cuenta con un datalogger que almacena temporalmente los datos cuando no hay conectividad, asegurando su posterior envío.

Está compuesta (Figura 6) por un soporte de montaje con panel solar de 10 W/12 V, caja NEMA, y sensores DHT22 (temperatura y humedad relativa), BMP180 (presión atmosférica), SEN0170 (velocidad del viento) y CS625 (humedad del suelo). Incluye además un controlador de alimentación, un Arduino Mega para la gestión de señales, un módulo SIM800L con chip Telcel y antena externa para envío de SMS, y componentes de potencia asociados.

Figura 6. Construcción de estación meteorológica y sus componentes.
Fuente: Elaboración propia.

El cliente web permite visualizar las mediciones en tiempo real y consultar registros históricos, mediante un tablero interactivo (Figura 7) que muestra cada variable en tarjetas dinámicas con su valor actual.

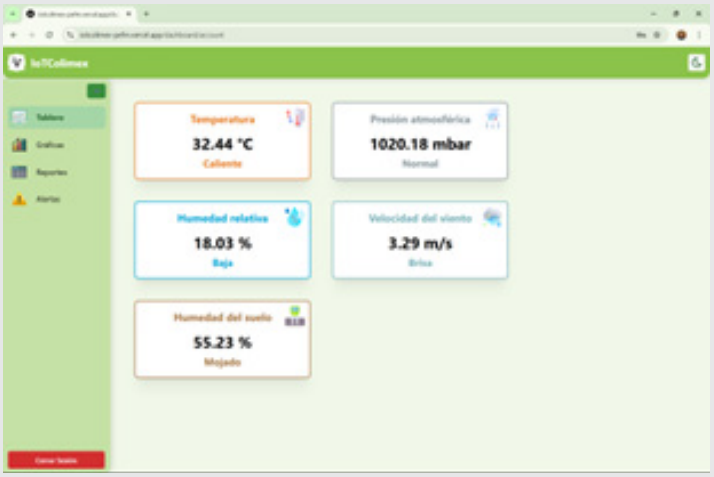


Figura 7. Dashboard de variables microclimáticas.
Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, el sistema dispone de un mecanismo de notificaciones flotantes (Figura 8) que alerta de condiciones anómalas detectadas en las mediciones. Las alertas recibidas desde el tópico MQTT se muestran de inmediato en la interfaz, indicando el tipo, variable afectada y valor registrado, para facilitar una respuesta rápida del usuario.

Figura 8. Notificación flotante de alerta registrada.
Fuente: Elaboración propia.

Pruebas experimentales

La validación del sistema se realizó en un entorno relevante, demostrando su viabilidad operativa y el correcto lanzamiento de alertas ante valores fuera del umbral permitido. Para ello, se aplicaron estímulos físicos a las variables de humedad del suelo y temperatura ambiental, con el fin de verificar el flujo completo de comunicación en la arquitectura MQTT, desde el publicista hasta el cliente web y móvil.

En la Figura 9 se muestra la disposición física del sensor de humedad del suelo, colocado en condiciones de

baja humedad, lo que provocó el envío de una alerta por valor fuera de rango al alcanzar un nivel inferior al 20 % de humedad.

Figura 9. Sensor de humedad de suelo en estado de baja humedad.
Fuente: Elaboración propia.

Para esto, el cliente MQTT publicista (estación meteorológica) envía mediante publicación los datos muestreados de los sensores. Esta publicación se realiza en el tópico GsmClientTest/data. El cambio en el tópico permite que el broker EMQX realice la notificación al suscriptor, en este caso una Raspberry Pi, el cual analiza y procesa los datos para su registro, validación y generación de alertas. Considerando el cambio del sensor a una posición de baja humedad provocando una medición de 18.35 % de humedad, fuera del umbral establecido, el suscriptor generó la "alerta por valor fuera de rango", como se muestra en la Figura 10.

```
Mensaje publicado en IoTColimexAlert/data: [
  {
    alert_id: 2,
    alert_type: 5,
    description: "Variable: Humedad del suelo,\n" +
      " Descripción: Humedad del suelo por debajo del rango permitido: 18.35%"
  }
]
Mensaje enviado por WhatsApp.
(9/10/2025, 1:31:04 p.m.): Registro insertado desde estación
Alertas insertadas en Supabase correctamente.
(2025-10-09T13:31:04): Última alerta insertada
```

Figura 10. Formato de alerta visible para pruebas funcionales en consola de comandos de la Raspberry Pi.
Fuente: Elaboración propia.

El suscriptor detecta un valor por debajo del umbral permitido en la humedad del suelo y formatea un mensaje tipo JSON para lanzarlo como alerta cambiando su rol a publicista y publicar la alerta en el tópico IoTColimexAlert/data. El cambio de estado en este tópico permite que el broker notifique al cliente Web, que implementa un cliente MQTT suscriptor, sobre la alerta como se observa en la Figura 11.

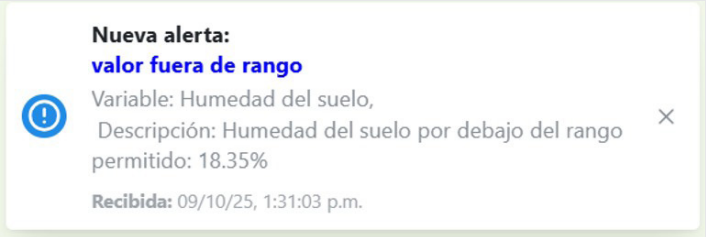


Figura 11. Captura de recepción de alerta por humedad del suelo baja en cliente web (notificación flotante).
Fuente: Elaboración propia.

La alerta se visualiza en el cliente web, mostrando un valor de 18.35% de humedad del suelo. Por otro lado, de manera paralela, se envía a través del servicio de Twilio desde la Raspberry Pi la alerta por Whatsapp, como se evidencia en la Figura 12.

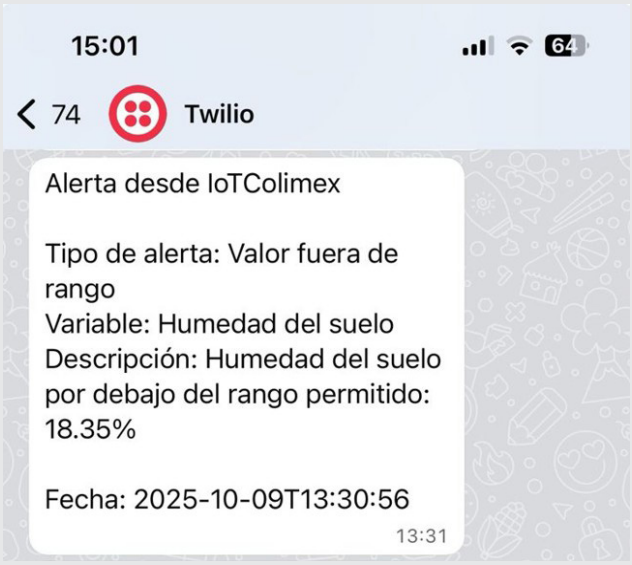


Figura 12. Notificación por WhatsApp de alerta por humedad del suelo baja.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 12 muestra la recepción de alertas por WhatsApp, donde se visualizan los datos, fecha y hora de emisión, así como la hora de recepción en el dispositivo móvil, registrando un tiempo de respuesta de 4 s entre ambos eventos. Asimismo, se realizó una prueba de temperatura fuera de rango, aplicando un estímulo térmico con un mechero sobre el sensor instalado en la estación, como se observa en la Figura 13.

El estímulo provocado por el acercamiento del mechero a la zona de medición del sensor de temperatura, genera un aumento en la temperatura ambiental. Al realizarse durante un periodo de tiempo continuo, el sensor detecta valores que, al compararse con los umbrales establecidos, resultan elevados y fuera del

rango normal de medición; provocando así, que el sistema lance una alerta por temperatura fuera de rango permitido superando los 38.6°C.

Figura 13. Sensor de temperatura con estímulo para elevar la temperatura ambiental.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 14 muestra la alerta por temperatura elevada en el cliente web como notificación flotante. Ésta, al igual que para cualquier categoría y/o variable es visible en todas las secciones del cliente web. Se pueden apreciar los detalles de la alerta junto con el valor registrado, así como la estampa de tiempo en la que se recibió la alerta.

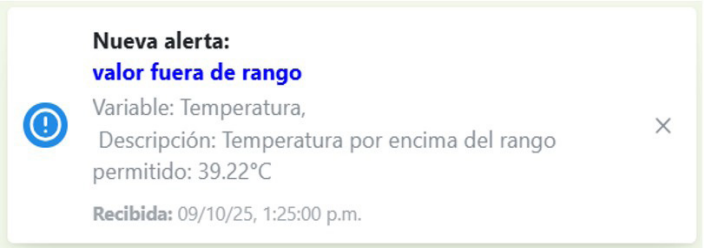


Figura 14. Alerta recibida en cliente web por temperatura fuera de rango.
Fuente: Elaboración propia.

Del mismo modo, la alerta también se recibe por WhatsApp tal y como se muestra a continuación.

Como se observa en la Figura 15, la alerta se recibe en WhatsApp con la información relacionada a la variable y sus valores capturados para el lanzamiento de la misma. Se aprecia, además, la fecha y hora de lanzamiento de la alerta dentro del mensaje y, además, se puede comparar con la hora de recepción del mismo mensaje de WhatsApp.

Figura 15. Notificación por WhatsApp de alerta por temperatura elevada.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Con el fin de resaltar las principales diferencias entre el sistema propuesto y las soluciones revisadas en la literatura, se elaboró una tabla comparativa. Esta muestra las funcionalidades clave implementadas en este trabajo y que no están presentes en los estudios seleccionados, evidenciando los aportes específicos de esta investigación en términos de análisis, notificación y visualización de datos microclimáticos.

Tabla 3. Datos comparativos.

Características	[28]	[29]	[30]	[31]	[32]	Sistema IoT propuesto
Detección de fallas de comunicación	✗	✗	✗	✗	✗	✔
Análisis con filtro de Kalman	✗	✗	✗	✗	✗	✔
Alertas por MQTT y SMS	✗	✗	✗	✗	✗	✔
Segmentación temporal de datos	✗	✗	✗	✗	✗	✔
Historial de alertas y mediciones	✗	✗	✗	✗	✗	✔
Generación de reportes	✗	✗	✗	✗	✗	✔
Visualización en dashboard web	✗	✗	✔	✔	✔	✔
Adaptabilidad a otros cultivos	✗	✗	✔	✔	✔	✔
Monitoreo de variables climáticas	✔	✗	✔	✗	✗	✔

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los criterios comparativos seleccionados, se evidencia que el sistema propuesto incorpora elementos que no están presentes de manera conjunta en los trabajos revisados, como el análisis con filtro de Kalman, la detección de fallas de comunicación, la emisión de alertas en tiempo real mediante MQTT y SMS, y la segmentación temporal para la visualización de

datos. Estas características, sumadas a la integración de sensores ambientales, así como a una interfaz web con historial y generación de reportes, consolidan una solución robusta, adaptable y centrada en la mejora del proceso de toma de decisiones agronómicas.

CONCLUSIONES

Se presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo y notificación de alertas microclimáticas para cultivos de limón, que integra tecnologías IoT, MQTT, junto con procesamiento de datos mediante un filtro de Kalman y mecanismos de alerta. El sistema detecta en tiempo real valores fuera de rango, lecturas atípicas y fallas de comunicación, notificando al usuario por Whatsapp y a través de una interfaz web con tablero de indicadores, visualización por periodos del día, historial y generación de reportes.

La validación funcional del sistema acorde con el nivel TLR-5 de maduración tecnológica, demostró la viabilidad operativa, estabilidad y coherencia de las mediciones en condiciones experimentales reales. Se comprobó un tiempo promedio de respuesta de 4 segundos entra la emisión y recepción de alertas, así como la reducción de ruido gracias a la implementación del filtro de Kalman, evitando falsas notificaciones y confirmando la confiabilidad del sistema hasta el momento. Estos resultados evidencian que la propuesta alcanza el objetivo propuesto y es viable técnicamente, proporcionando una arquitectura escalable, de bajo costo y de fácil extrapolación a otros cultivos agrícolas, fortaleciendo con esto su potencial en distintos escenarios agrícolas.

Como trabajo futuro, se contempla la validación agronómica en campo operativo de limón mexicano, integrando observaciones manuales y registros productivos para comparar la precisión del sistema frente a métodos tradicionales. Asimismo, se desarrollará un análisis estadístico de desempeño (errores, correlaciones y sensibilidad del filtro), la incorporación de modelos predictivos de eventos climáticos y la implementación de módulos inteligentes de recomendación técnica. Estos avances permitirán evolucionar el sistema hacia una plataforma integral de agricultura de precisión para el sector citrícola nacional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al SECIHTI, al Tecnológico Nacional de México, al Instituto Tecnológico de Colima y al comité académico por el apoyo brindado, en especial a la directora de tesis por su valiosa orientación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] FAO, "Gross domestic product and agriculture value added 2013–2022: Global and regional trends," Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2024. [Online]. Available: https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/gross-domestic-product-and-agriculture-value-added-2013-2022.-global-and-regional-trends/en.

[2] INEGI, "Cuentas de Agricultura, Ganadería, Silvicultura y Pesca 2022," Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Comunicado de Prensa Núm. 431/23, Aguascalientes, México, 2023. [Online]. Available: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA_Def/CA_Def2022.pdf. [Accessed: Oct. 16, 2025].

[3] CONAGUA y SMN, "Monitor de Sequía en México, 15 de agosto de 2024," Comisión Nacional del Agua y Servicio Meteorológico Nacional, México, 2024. [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/953281/Monitor_de_Sequ_a-15-Agosto-2024.pdf.

[4] SADER y SIAP, "Expectativas de Producción Agropecuaria: Limón, julio de 2024," Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural y Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, México, 2024. [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/938466/Lim_n_Julio.pdf.

[5] INEGI, "Cuentas de Agricultura, Ganadería, Silvicultura y Pesca 2022. Colima," Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Comunicado de Prensa Núm. 432/23, Aguascalientes, México, 2023. [Online]. Available: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA_Def/CA_Def2022_Col.pdf.

[6] Cámara de Diputados, "Maíz y frijol: así los impacta la sequía en la agricultura", Revista Comunicación Social, Cámara de Diputados, México, 2024. [Online]. Available: https://comunicacionsocial.diputados.gob.mx/revista/index.php/nuestros-centros/maiz-y-frijol-asi-los-impacta-la-sequia-en-la-agricultura.

[7] PINCC–UNAM, "Afecta cambio climático agricultura de temporal en México," Programa de Investigación en Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, 2024. [Online]. Available: https://www.pincc.unam.mx/afecta-cambio-climatico-agricultura-de-temporal-en-mexico/.

[8] E. Morales, "Producción mexicana de cítricos disminuiría 1.5 %," El Economista, 4 de enero de 2024. [Online]. Available: https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Produccion-mexicana-de-citricos-disminuiria-1.5-20240104-0086.html.

[9] M. Agustí, C. Reig, A. Martínez-Fuentes, and C. Mesejo, "Advances in citrus flowering: A review," Frontiers in Plant Science, vol. 13, art. 868831, pp. 1–13, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.868831.

[10] INIFAP, "Biología y manejo integrado de antracnósis del limón mexicano en el trópico seco de México,"Compucampo.com, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México, 2006. [Online]. Available: https://www.compucampo.com/tecnicos/biologiamanejointegradoantracnosis-limonmexicano.pdf.

[11] M. M. Dewdney, "2024–2025 Florida Citrus Production Guide: Alternaria Brown Spot," EDIS, CPG ch. 37, CG021/PP-147, rev. 8/2025, University of Florida, Gainesville, FL, USA, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.32473/edis-cg021-2023.

[12] M. Orozco-Santos, M. Robles, J. Velázquez-Monreal, M. Manzanilla-Ramírez, M. Bermúdez-Guzmán, S. Medrano, M. Medina-Urrutia, L. Hernández-Fuentes, R. Gómez-Jaimes, G. Manzo-Sánchez, J. Farías-Larios, D. Nieto-Angel, E. Mijangos-Hernández, J. Torre, and S. Varela-Fuentes, "El limón mexicano," Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), México, 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/379052951_EL_LIMON_MEXICANO.

[13] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, "Plagas y enfermedades comunes del limón," gob.mx, México, 2021. [Online]. Available: https://www.gob.mx/agricultura/articulos/plagas-y-enfermedades-comunes-del-limon.

[14] J. G. Pérez-Pérez, J. M. Robles, F. García-Sánchez, and P. Botía, "Comparison of deficit and saline irrigation strategies to confront water restriction in lemon trees grown in semi-arid regions," Agricultural Water Management, vol. 164, pp. 46–57, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.015.

[15] University of California, "Fruit drop of citrus," Ucanr.edu, Statewide Integrated Pest Management Program, 2025. [Online]. Available: https://ipm.ucanr.edu/home-and-landscape/fruit-drop-of-citrus/.

[16] UF/IFAS, "Windbreaks2 – Citrus Research and Education Center (CREC) – University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences," Ufl.edu, University of Florida, Gainesville, FL, USA, 2025. [Online]. Available: https://crec.ifas.ufl.edu/extension/windbreaks2/.

[17] Banco Mundial, "Agricultura y alimentación: Panorama general," worldbank.org, 2024. [Online]. Available: https://www.worldbank.org/en/topic/agriculture/overview#1.

[18] H. Majeed, W. Azeem, A. A. Malik, U. Ahmad, and H. Sultan, "Cultivating innovation: An in-depth exploration of IoT and AI in smart agriculture," Pakistan Journal of Scientific Research, vol. 4, no. 1 Suppl., pp. 119–130, 2024.

[19] INIFAP, "Adopción tecnológica ante el cambio climático y la seguridad alimentaria," Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México, 2024. [Online]. Available: https://www.gob.mx/inifap/articulos/adopcion-tecnologica-ante-el-cambio-climatico-y-la-seguridad-alimentaria.

[20] Amazon Web Services (AWS), "¿Qué es IoT? – Internet de las cosas explicado," aws.amazon.com, [Online]. Available: https://aws.amazon.com/es/what-is/iot/.

[21] N. N. Thilakarathne, M. S. Abu Bakar, P. E. Abas, and H. Yassin, "Towards making the fields talk: A real-time cloud enabled IoT crop management platform for smart agriculture," Frontiers in Plant Science, vol. 13, art. 1030168, pp. 1–12, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1030168.

[22] G.-E. Chanchí-Golondrino, M.-A. Ospina-Alarcón, and M. Saba, "Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana," Revista Científica, vol. 44, no. 2, pp. 257–271, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.14483/23448350.18470.

[23] M. Montaño-Blacio, J. González-Escarabay, O. Jiménez-Sarango, L. Mingo-Morocho, and C. Carrión-Aguirre, "Diseño y despliegue de un sistema de monitoreo basado en IoT para cultivos hidropónicos," Ingenius, no. 30, pp. 9–18, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.01. [Accessed: Oct. 16, 2025].

[24] D.-I. Săcăleanu, M.-G. Matache, Ş.-G. Roşu, B.-C. Florea, I.-P. Manciu, and L.-A. Perişoară, "IoT-Enhanced Decision Support System for Real-Time Greenhouse Microclimate Monitoring and Control," Technologies, vol. 12, no. 11, art. 230, pp. 1–17, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/technologies12110230.

[25] Food and Agriculture Organization (FAO), "Possibilities of the Internet of Things (IoT) in agriculture," FAO e-Agriculture, 2017. [Online]. Available: https://www.fao.org/e-agriculture/news/possibilities-internet-things-iot-agriculture.

[26] C. E. Blázquez Gutiérrez, P. E. Figueroa Millán, I. Amezcua Valdovinos, R. E. Chávez Valdez, and S. Arceo Díaz, "Diseño arquitectural de sistema IoT para monitorización de condiciones climáticas en cultivos de limón mexicano," FE-

GLININ, vol. 3, no. 4, pp. 56–62, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/375606175.

[27] M. C. Abad Alay, M. A. Méndez García, and O. Erazo Moreta, "Tecnología de Internet de las Cosas en el monitoreo de cultivos agrícolas," Revista Odigos, vol. 4, no. 3, pp. 69–93, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.35290/ro.v4n3.2023.939.

[28] H. Zia, A. Rehman, N. R. Harris, S. Fatima, and M. Khurram, "An experimental comparison of IoT-based and traditional irrigation scheduling on a flood-irrigated subtropical lemon farm," Sensors, vol. 21, no. 12, art. 4175, pp. 1–14, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/s21124175.

[29] D. Sabu, P. Alagumariappan, V. Sankaran, and P. S. K. R. Pittu, "Design and development of Internet of Things-based smart sensors for monitoring agricultural lands," Engineering Proceedings, vol. 58, no. 13, art. 16207, pp. 1–6, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/ecsa-10-16207. [Accessed: Oct. 16, 2025].

[30] Y. Zhang, X. Wang, L. Jin, J. Ni, Y. Zhu, W. Cao, and X. Jiang, "Research and development of an IoT smart irrigation system for farmland based on LoRa and edge computing," Agronomy, vol. 15, no. 2, art. 366, pp. 1–15, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/agronomy15020366. [Accessed: Oct. 16, 2025].

[31] H. Shahab, M. Naeem, M. Iqbal, M. Aqeel, and S. S. Ullah, "IoT-driven smart agricultural technology for real-time soil and crop optimization," Smart Agricultural Technology, vol. 10, art. 100847, pp. 1–11, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100847. [Accessed: Oct. 16, 2025].

[32] A. Liopa-Tsakalidi, V. Thomopoulos, P. Barouchas, A. D. Boursianis, and S. K. Goudos, "A LoRaWAN-based IoT platform for smart irrigation in olive groves," Smart Agricultural Technology, vol. 9, art. 100673, pp. 1–12, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100673. [Accessed: Oct. 16, 2025].

[33] Consejo Estatal de Productores de Limón, "Nosotros," COEPLIM, [Online]. Available: https://www.coeplimcolima.com/nosotros. [Accessed: Mar. 28, 2025].

[34] C. De la Cruz Casaño, "Metodología de la investigación tecnológica en ingeniería," Revista Ingenium, vol. 1, no. 1, pp. 43–46, 2016. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.18259/ing.2016007.

[35] B. W. Boehm, "A spiral model of software development and enhancement," IEEE Computer, vol. 21, no. 5, pp. 61–72, 1988. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/2.59.

[36] I. Christakis, O. Tsakiridis, D. Kandris, and I. Stavrakas, "A Kalman Filter Scheme for the Optimization of Low-Cost Gas Sensor Measurements," Electronics, vol. 13, no. 1, art. 25, pp. 1–15, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/electronics13010025.

[37] LoRaWAN®, "The Things Network," [Online]. Available: https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/.

[38] Digi International, "What is Zigbee? Learn about Zigbee wireless mesh technology," digi.com, Jul. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.digi.com/solutions/by-technology/zigbee-wireless-standard.

[39] IEEE Standards Association (IEEE SA), "The Evolution of Wi-Fi Technology and Standards," ieee.org, 2023. [Online]. Available: https://standards.ieee.org/beyond-standards/the-evolution-of-wi-fi-technology-and-standards/.

[40] A. S. Gillis, D. Jones, and K. Beaver, "LTE (long-term evolution)," Search Mobile Computing, TechTarget, Mar. 9, 2023. [Online]. Available: https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/Long-Term-Evolution-LTE.

[41] "MQTT – The Standard for IoT Messaging," mqtt.org, [Online]. Available: https://mqtt.org/.

[42] "CoAP Protocol: Features, use cases, pros & cons for IoT," emqx.com, [Online]. Available: https://www.emqx.com/en/blog/coap-protocol.

Ciencias de la Computación

Ingeniantes

CitruScan: Un Enfoque Basado en Redes Neuronales para Proteger la Producción de Limones

Colaboración
Juan A. Guerrero-Ibáñez; Juan Contreras-Castillo,
Universidad de Colima

Fecha de recepción: 22 de agosto de 2025
Fecha de aceptación: 13 de septiembre de 2025

RESUMEN: Una de las principales amenazas para la producción de limón en México son las enfermedades causadas por virus, bacterias y hongos. La detección temprana de enfermedades es esencial para reducir las pérdidas económicas, sin embargo, los métodos tradicionales son costosos y poco eficientes. En este trabajo se propone CitruScan, un modelo híbrido que combina redes neuronales convolucionales (CNN) para la extracción de características con Random Forest (RF) para la clasificación de imágenes de hojas de limón. Se empleó un dataset de 1354 imágenes (8 clases de enfermedades más hojas sanas), obtenidas de Kaggle, dividido en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba. Los resultados muestran que CitruScan alcanzó una exactitud superior al 99%, superando a métodos convencionales como ResNet, MobileNet y VGG16 usados en trabajos publicados en la literatura. Los resultados muestran la eficacia de la propuesta como una herramienta para el diagnóstico temprano de enfermedades en plantaciones de limón.

PALABRAS CLAVE: Aprendizaje profundo, clasificación de enfermedades, hojas de limón, redes generativas adversariales, redes neuronales convolucionales.

ABSTRACT: One of the main threats to lemon production in Mexico is diseases caused by viruses, bacteria, and fungi. Early disease detection is essential to reduce economic losses; however, traditional methods are costly and inefficient. In this work, we propose CitruScan, a hybrid model that combines Convolutional Neural Networks (CNNs) for feature extraction with Random Forest (RF) for the classification of lemon leaf images. A dataset of 1,354 images (8 disease classes plus healthy leaves), obtained from Kaggle, was used and divided into training, validation, and testing sets. The results show that CitruScan achieved an accuracy above 99%, outperforming conventional methods such as ResNet, MobileNet, and VGG16 reported in the literature. The results demonstrate the effectiveness of the proposed approach as a tool for the early diagnosis of diseases in lemon plantations.

KEYWORDS: Convolutional neural networks, Deep learning, disease classification, generative adversarial networks, lemon leaves.

INTRODUCCIÓN

El limón es uno de los frutos de gran importancia para el consumo nacional y es uno de los productos de mayor exportación en México. De acuerdo con datos publicados por el gobierno de México, en 2024, nuestro país se consolidó como el segundo productor y exportador de limón a nivel mundial, solamente por debajo de la India [1]. Colima ocupa el tercer lugar a nivel nacional en la producción de limón, solo por detrás de Michoacán, y Veracruz, produciendo en el 2023 un total de 312,047 toneladas [1].

El gobierno federal expresa que existe una serie de patógenos que afectan a los cítricos y que pueden ocasionar efectos

adversos como reducción de la producción, calidad del fruto o incluso la muerte de los árboles [2]. Las enfermedades que afectan a la producción de limón en México incluyen Antracnosis, el virus de la tristeza, araña roja, entre otras.

Para la detección de enfermedades en los cultivos comúnmente se aplican tres métodos: i) identificación visual por personas expertas, ii) análisis de características morfológicas para identificación de patógenos y iii) técnicas de diagnóstico molecular y microbiológico [3]. Sin embargo, estos métodos son costosos, es susceptible a errores subjetivos por parte de los expertos y se invierte mucho tiempo, lo que puede impulsar la proliferación de la enfermedad. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO) las enfermedades son responsables de pérdidas que oscilan entre 20% y 40% de la producción total [4].

En este contexto, es necesario implementar técnicas de diagnóstico y monitoreo temprano con el fin de identificar enfermedades en los cultivos y evitar su pronta diseminación.

Con respecto a la identificación de enfermedades en el limón, las redes neuronales convolucionales (CNN – por sus siglas en inglés Convolutional Neural Networks) se han convertido en uno de los métodos preferidos para la clasificación y detección. La mayoría de los trabajos hacen uso de redes neuronales pre-entrenadas. Por ejemplo, en [5] se utilizaron ResNet, MobileNet y VGG16 para identificar enfermedades en las hojas de limón dulce. Los resultados mostraron que MobileNet alcanzó la mejor exactitud (89%), sin embargo, no detallaron las características del dataset. La limitación del enfoque es la falta de análisis profundo de los datos y la dependencia de modelos pre-entrenados.

En [6] utilizaron una versión modificada de AlexNet para la detección de enfermedades en cultivos, mostrando resultados competitivos en clasificación. Las limitantes del artículo son el uso de un dataset reducido lo que impacta la generalización en campo.

En [7] se presenta un modelo de diagnóstico de enfermedades en hojas basado en segmentación y AlexNet. La propuesta mejora la extracción de características al reducir ruido en las imágenes. La principal limitante es su procesamiento complejo y sensible a variaciones de iluminación, lo que puede afectar su aplicabilidad en escenarios agrícolas reales.

Por otro lado, en [8] se propuso un modelo híbrido basado en CNN y Support Vector Machine (SVM) para detectar niveles de severidad de cancros en limón, con un dataset generado en los campos de Punjab, India y estaba formado por 6 categorías de severidad de la enfermedad. El modelo alcanzó una exactitud media de 94.03%. Sin embargo, el conjunto de datos es cerrado y los autores no proporciona información sobre la estructura del mismo, limitando la reproducibilidad del estudio.

Los autores en [9] aplicaron modelos de aprendizaje profundo con aprendizaje de transferencia (DenseNet-201, ResNet-50, ResNet-152V2, y Xception) y utilizaron un conjunto de datos propio. Los resultados mostraron que el mejor modelo fue Xception con una exactitud alrededor de 94.34%. Si bien el modelo obtuvo un buen desempeño, la principal limitación es su alto costo computacional, lo que restringe su aplicación práctica en entornos agrícolas con pocos recursos.

Finalmente, los autores en [10] propusieron un modelo híbrido CNN-SVM para clasificar 4 enfermedades en hojas de limón, utilizando un conjunto de datos de 4821 imágenes y obteniendo una exactitud de 89.6%. Sin embargo, a pesar de usar un conjunto de datos amplio, su exactitud fue inferior a 90%.

Se puede observar que los trabajos previos muestran resultados que rara vez superan el 94% de exactitud y tienen limitaciones con respecto a conjunto de datos reducidos y costos computacionales altos.
En este trabajo presentamos CitruScan, un modelo híbrido que combina CNN para el proceso de extracción de características con Random Forest(RF) para el proceso de clasificación de imágenes. Además del aporte metodológico, CitruScan tiene un impacto práctico directo en el ámbito agrícola. La herramienta puede ser implementada en aplicaciones móviles permitiendo a los productores de cítricos identificar de forma temprana enfermedades en las hojas, incluso sin experiencia previa en diagnóstico visual.

MATERIAL Y MÉTODOS

CitruScan es un modelo híbrido CNN-RF para la clasificación e identificación de enfermedades en las hojas de limón. Como entradas de la arquitectura se tienen un conjunto de datos de imágenes de hojas de limón. La salida de la arquitectura muestra tres elementos claves: i) una etiqueta indicando la enfermedad que se detectó o confirmando que la hoja está sana de acuerdo con la imagen, ii) una etiqueta representando el resultado de clasificación que se obtuvo como resultado con CitruScan y iii) el porcentaje de confidencia asociado con la predicción realizada por el modelo.

Modelo de CitruScan

Este estudio propone un modelo para detectar enfermedades en las hojas del limón. La Figura 1 muestra los componentes de CitruScan, compuesta por dos bloques: i) un bloque de aprendizaje de características y ii) un bloque de clasificación.

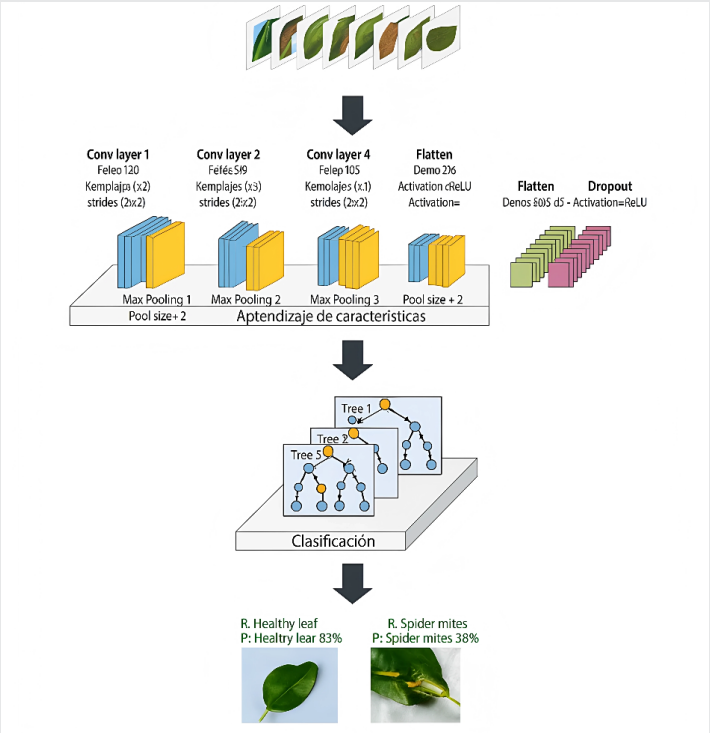


Figura 1. Representación de la arquitectura CitruScan.
Fuente: Elaboración propia.

El bloque de aprendizaje de características recibe las imágenes de entrada en un tamaño definido de 128x128 píxeles con tres canales de color, a las cuales se les aplicó normalización de los valores de los píxeles. La red neuronal que se implementó consta de 4 capas convolucionales con tamaños de filtros de 16, 32,64 y 128, cada una con un kernel de 3x3 y la función de activación ReLU (Rectified Lineal Unit). Posteriormente, se aplica una capa Flatten para transformar el tensor multidimensional en un vector, a continuación, se aplica una capa densa para reducir la dimensionalidad y facilitar el aprendizaje de las características extraídas.

Para el entrenamiento se utilizó el optimizador Adam, se definió la tasa de aprendizaje inicial de 0.001, el batch size de 32. Se aplicaron 100 épocas y se utilizó el ambiente MGPU (Multiple-Graphics Processing Unit) de colab.
El bloque de clasificación recibe las características extraídas por la red neuronal y aplica el proceso de clasificación mediante el algoritmo Random Forest (RF) Para tener un equilibrio entre rendimiento y costo computacional se aplicó una configuración de 500 árboles, una profundidad máxima de 20, y como criterio de división Gini.

Conjunto de datos (dataset)
Para el entrenamiento y validación de CitruScan se utilizó el dataset público Lemon leaf disease dataset (LLDD), un conjunto de datos con imágenes de alta calidad diseñado para entrenar y validar modelos de aprendizaje máquina para la clasificación de enfermedades del limón [11]. El dataset consiste en un total de 1354 imágenes en formato jpg con tamaños de 1000x1000 a 300dpi. Las imágenes están distribuidas en 9 categorías que representan 8 enfermedades (Anthracnose, Bacterial Blight, Citrus Canker, Curl Virus, Deficiency Leaf, Dry Leaf, Sooty Mould, y Spider Mites) y la categoría de hoja saludable (healthy leaf). La distribución del del conjunto de datos se muestra en la tabla 1.

Para garantizar una evaluación justa del modelo, el dataset se dividió en tres subconjuntos: 70% para entrenamiento, 15% para validación y 15% para prueba, utilizando un muestreo estratificado para mantener el balance de clases.

Tabla 1. Distribución del conjunto de datos por categoría.

Categoría	Número de imágenes
Anthracnose	100
Bacterial Blight	105
Citrus Canker	178
Curl Virus	115
Deficiency Leaf	193
Dry Leaf	186
Sooty Mould	153
Spider Mites	114
Healthy leaf	210
Total	1354

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2 muestra un ejemplo de las imágenes utilizadas para el presente trabajo.

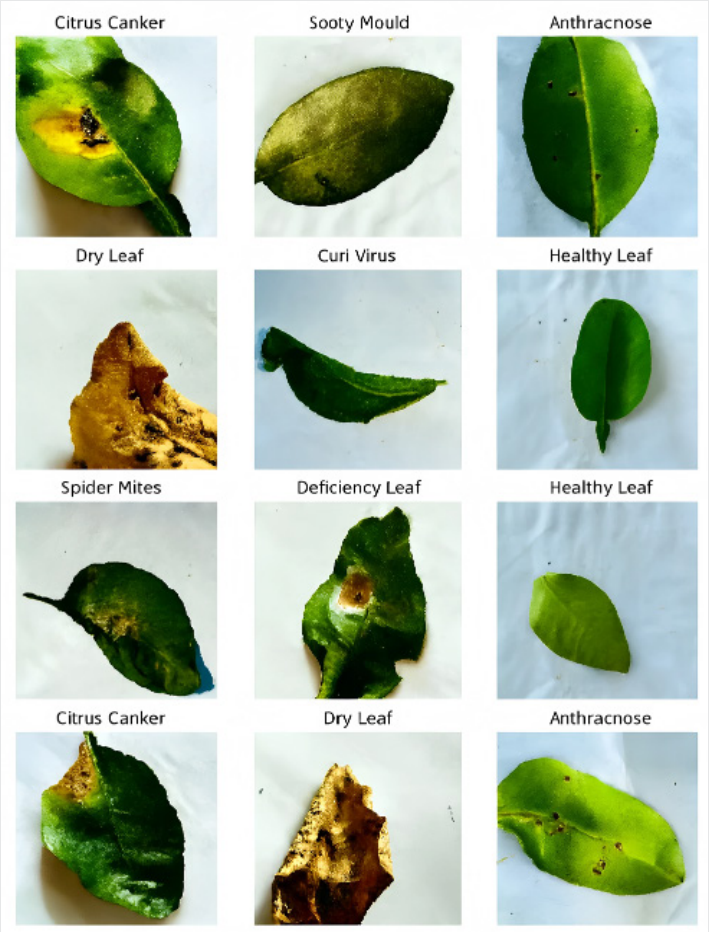


Figura 2. Representación de imágenes usadas en CitruScan.
Fuente: Elaboración propia.

Uno de los retos más comunes para los conjuntos de datos es el overfitting, es decir, un problema que hace que el modelo "memorice" los datos de entrenamiento más que tener un aprendizaje generalizado. Para reducir este efecto, se utilizan técnicas de aumento de datos, que incrementan el tamaño del conjunto de entrenamiento y mejoran la capacidad de generalización [12].

Los métodos tradicionales expanden el conjunto de datos mediante la creación de nuevas imágenes usando las imágenes existentes aplicando transformaciones como traslación, rotación, ajuste de brillo, acercamiento, alejamiento, transformaciones, entre otras técnicas. Sin embargo, estas técnicas pueden generar imágenes redundantes y pérdida de calidad de las imágenes.
Las técnicas recientes son conocidas como Redes generativas adversariales (GAN – Generative Adversarial Networks) [13], las cuales aplican métodos de aprendizaje profundo incluyendo Vanilla GAN [14], Deep Convolutional GAN [15] o Conditional GAN [16] para la generación de muestras sintéticas que mantienen características estadísticas del conjunto de datos original.

En este trabajo se implementó una Deep Convolutional GAN (DCGAN) para incrementar y balancear el conjunto de datos de hojas de limón. El generador incluyó 4 capas convolucionales transpuestas, activación ReLU en las capas ocultas y Tanh en la salida. El discriminador incluyó 4 capas convolucionales, activación LeakyReLU en las capas ocultas y Sigmoid en la salida. El optimizados fue Adam con tasa de aprendizaje de 0.0002 y β1=0.5, además se aolicaron 200 epocas, completando un total de 3600 imágenes, balanceando las imágenes en cada categoría a 400. La validación de las imágenes solamente se realizó mediante inspección visual por un experto agrónomo.

CitruScan combina CNN, Random Forest y DCGAN, lo cual se considera su principal innovación, ofreciendo ventajas frente a redes convolucionales profundas con regularización, incluyendo una mejora de la capacidad de generalización al separar la extracción de características de la clasificación (Random Forest), reduciendo el riesgo de sobreajuste en escenarios con conjuntos de datos limitados, y DCGAN permite un balance de las clases.

RESULTADOS

En esta sección, describimos la configuración del escenario de pruebas y los resultados obtenidos en la evaluación de desempeño del modelo propuesto.

Configuración

El desarrollo del modelo se realizó en Google collaboratory [17], un ambiente de desarrollo gratuito que usa el lenguaje Python y se ejecuta en la nube. El modelo fue entrenado con 100 épocas y se aplicó early stopping para controlar el rendimiento del modelo durante todas las épocas para reducir el overfitting y mejorar de esta manera la generalización de la red neuronal. Se definió un tamaño de batch de 32, se aplicó el optimizador Adam, la tasa de aprendizaje inicial se configuró a 0.001, como es un problema multi-clase, se utilizó la función de pérdida cross-entropy categorical.

Métricas de evaluación

Para analizar el rendimiento del modelo propuesto, se utilizaron las cuatro métricas más utilizadas: accuracy, precisión, recall y F1 score.

Accuracy representa el comportamiento del modelo a través de todas las clases. El parámetro accuracy se calcula como el radio entre el número correcto de predicciones entre el total de predicciones.

La precisión representa la exactitud del modelo en clasificar una muestra como positiva.

Recall mide la habilidad del modelo para detectar muestras positivas y F1 score combina las métricas de precisión y recall para obtener un único valor.

Otro de las métricas que se utilizó fue la matriz de confusión, un método que permite representar visualmente los resultados del algoritmo clasificador. En esta representación visual se desglosa el número de instancias reales de una clase específica frente al número de instancias previstas para esa clase. La matriz de confusión se puede utilizar para calcular otras métricas de rendimiento del modelo, como la precisión y la coincidencia, entre otras.

Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos por el modelo y que se muestran en la Figura 3, el modelo alcanzó un 99.1% de exactitud en la fase de entrenamiento y 99.3 en la fase de validación

La Figura 4 muestra la matriz de confusión que el modelo propuesto obtuvo durante su evaluación. La figura muestra que el modelo propuesto alcanza un desempeño muy alto en la clasificación de las enfermedades de las hojas de limón, reflejando predicciones correctas en la mayoría de las clases y errores de clasificación mínimos, lo cual indica una adecuada capacidad de generalización del modelo. El resultado muestra la robustez del esquema CNN + RF, validando su eficacia en escenarios multiclase.

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos con las diferentes métricas analizadas para cada una de las clases. Se observa que el modelo muestra un comportamiento equilibrado en su desempeño en

todas las métricas para cada categoría, lo que evita el sesgo hacia una categoría en particular. El sistema no solo obtiene una exactitud global alta, sino un rendimiento similar de forma individual.

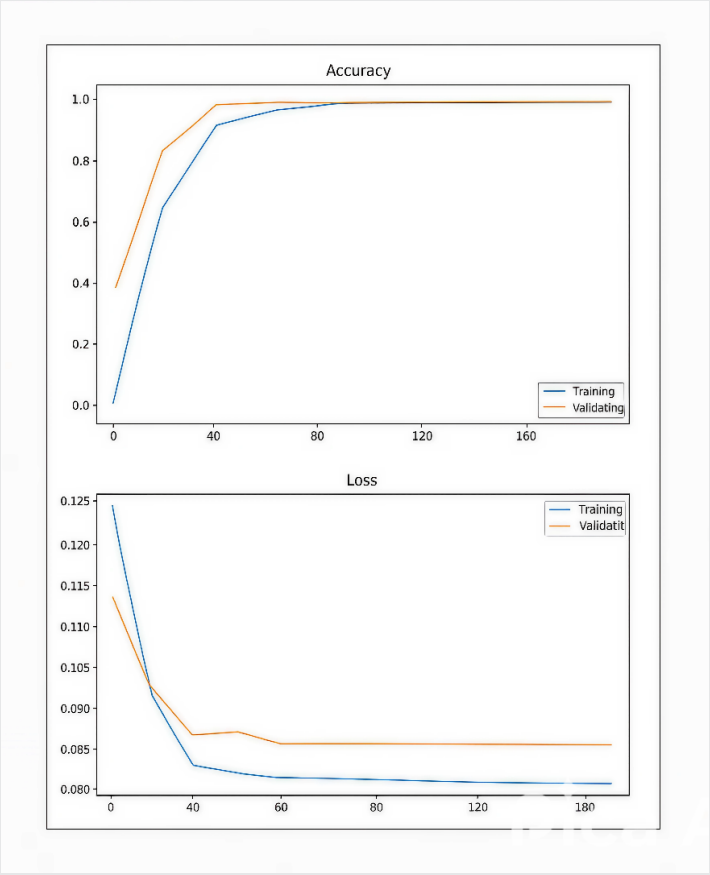


Figura 3. Resultados de desempeño obtenido por el modelo propuesto durante la fase de entrenamiento y validación.
Fuente: Elaboración propia generada por el modelo propuesto.

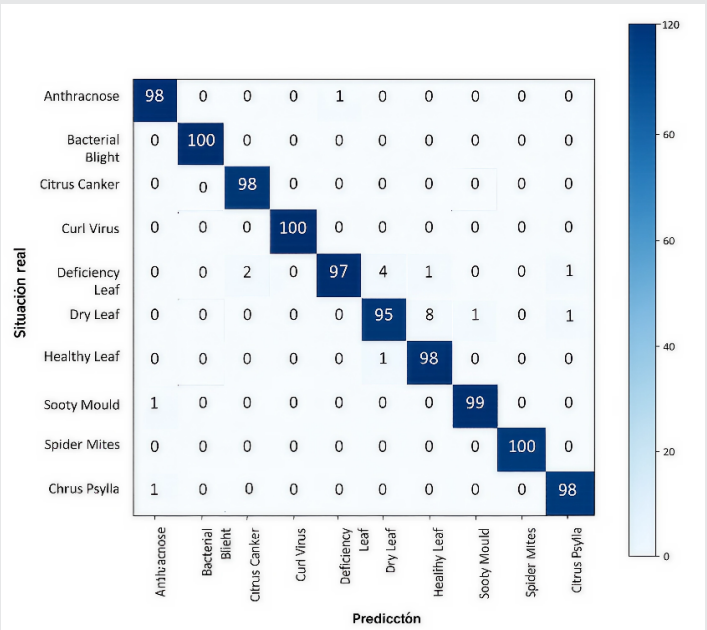


Figura 4. Matriz de confusión del modelo propuesto.
Fuente: Elaboración propia.

Desde nuestra opinión, el desempeño alcanzado se puede atribuir al uso como clasificador de Random Forest en lugar de un modelo puro basado en CNN. RF contribuye a una mejor generalización, lo que reduce la probabilidad de sobreajuste. Además, el incremento del conjunto de datos para lograr su balance logró reducir la probabilidad de sobreajuste y una mayor diversidad de las categorías, que como lo muestran los resultados se refleja en una mejora del desempeño del modelo.

Tabla 2. Tabla de desempeño por clase.

Categoría	Precisión (%)	Recall (%)	F1-score (%)
Anthracnose	98.99	98.99	98.49
Bacterial Blight	100.00	100.00	100.00
Citrus Canker	98.00	98.00	98.00
Curl Virus	100.00	100.00	100.00
Deficiency Leaf	95.10	97.00	96.04
Dry Leaf	95.00	95.00	95.00
Sooty Mould	99.00	99.00	99.0
Spider Mites	100.00	100.00	100.00
Healthy leaf	97.03	98.00	97.51

Fuente: Elaboración propia.

El tiempo invertido en el proceso de entrenamiento fue de 5987 segundos en el ambiente MGPU (Multiple-Graphics Processing Unit) de colab. Se puede observar claramente que el modelo obtuvo mejores resultados que los obtenidos en los trabajos analizados en la sección 2 y que se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Distribución del conjunto de datos por categoría.

Trabajo	Modelos usados	Resultado obtenido
Reddy & Thrirunavukkarasu [5]	Modelos pre-entrenados ResNet, MobileNet y VGG16	89%
Kukreja [8]	CNN y SVM	94.03%
Pramanik [9]	DenseNet-201, ResNet-50, ResNet-152V2, and Xception	94.34%
Gupta [10]	CNN y SVM	89.6%
Modelo propuesto	CNN y RF	99.4%

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la Figura 5 presenta la matriz de confusión, la cual refleja que el modelo propuesto fue capaz de alcanzar valores de precisión del 100% para casi la tercera parte de las categorías evaluadas, una quinta parte obtuvo valores de 99%, otra quinta parte alcanzó un 98% de exactitud y solamente una categoría es la que obtuvo un rendimiento del 95%, el cual es mejor que los valores obtenidos por los modelos con los que se compararon.

Después del entrenamiento y validación del modelo, el modelo y los pesos obtenidos se guardaron como un archivo de datos jerárquico para realizar predicciones

con el modelo. Se utilizaron 100 imágenes aleatorias para realizar predicciones del modelo, los resultados se muestran en la Figura 6. Para cada predicción, se muestra la imagen, el resultado real, y el resultado de predicción junto con el porcentaje de exactitud obtenido con el modelo propuesto.

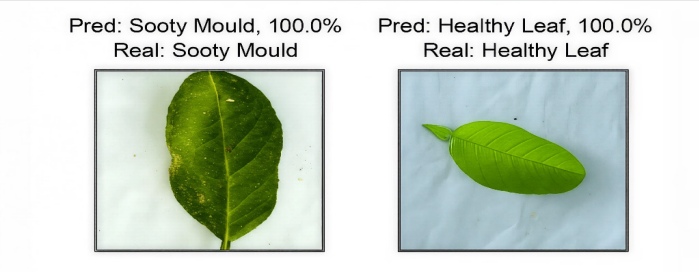


Figura 5. Representación de resultados de predicción obtenidos con el modelo propuesto.
Fuente: Elaboración propia generada por el modelo propuesto.

Aunque los resultados fueron buenos, existen limitaciones como el tamaño del conjunto de datos, que, aunque se aumentó, sigue siendo un conjunto de datos pequeño. Además, este estudio uso imágenes sintéticas, lo que podría generar sesgos al aplicarse en entornos reales. Finalmente, cabe aclarar que debido a que algunos trabajos usaron conjuntos de datos privados o cerrados, es difícil establecer un comparativo justo. Si bien nuestro trabajo utilizó un conjunto de datos público, la heterogeneidad de conjuntos de datos en la literatura puede sesgar la comparación de los modelos.

CONCLUSIONES

En este trabajo se propone un modelo híbrido basado en redes neuronales convolucionales y el algoritmo Random Forest para la identificación y clasificación de enfermedades en las hojas del limón. La red neuronal propuesta demostró tener alto desempeño en la extracción de características, permitiendo al clasificador alcanzar una exactitud de 99%. Además de la exactitud, se evaluaron métricas complementarias como precisión, recall y F1-score, que confirmaron la capacidad del modelo para discriminar de forma confiable entre diferentes enfermedades.

La combinación CNN+RF contribuyó a la generalización a diferencia de modelos basados únicamente en transfer learning. El uso de DCGAN contribuyó en el balanceo de las categorías, reduciendo el riesgo de sobreajuste.

Sin embargo, el modelo tiene algunas limitaciones, incluyendo que el conjunto de datos sigue siendo relativamente pequeño (3600 imágenes) y se generó parcialmente con datos sintéticos. Además, el modelo solo se evaluó en condiciones de laboratorio, por lo que es necesario evaluar el rendimiento en escenarios de campo real.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, "Ratifica México su posición como segundo productor y exportador mundial de limones y limas," gob.mx. Accessed: Feb. 28, 2025. [Online]. Available: http://www.gob.mx/agricultura/prensa/ratifica-mexico-su-posicion-como-segundo-productor-y-exportador-mundial-de-limones-y-limas.

[2] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, "Plagas y enfermedades comunes del limón," gob.mx. Accessed: Feb. 26, 2025. [Online]. Available: http://www.gob.mx/agricultura/articulos/plagas-y-enfermedades-comunes-del-limon.

[3] C. H. Bock, G. H. Poole, P. E. Parker, and T. R. Gottwald, "Plant Disease Severity Estimated Visually, by Digital Photography and Image Analysis, and by Hyperspectral Imaging," Critical Reviews in Plant Sciences, vol. 29, no. 2, pp. 59–107, 2010, doi: 10.1080/07352681003617285.

[4] Food and Agriculture Organizarion of the United Nations, "FAO - News Article: Climate change fans spread of pests and threatens plants and crops, new FAO study." Accessed: Nov. 10, 2022. [Online]. Available: https://www.fao.org/news/story/en/item/1402920/icode/.

[5] K. R. G. Reddy and K. S. Thirunavukkarasu, "Deep Learning Approach for Disease Detection in Sweet Lemon Leaves to Enhance Citrus Fruit Yield," in 2024 8th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), 2024, pp. 786–792. doi: 10.1109/ICECA63461.2024.10800763.

[6] J.-F. Yeh, S.-Y. Wang, and Y.-P. Chen, "Crop Disease Detection by Image Processing Using Modified Alexnet," in 2021 IEEE 3rd Eurasia Conference on Biomedical Engineering, Healthcare and Sustainability (ECBIOS), 2021, pp. 159–160. doi: 10.1109/ECBIOS51820.2021.9510426.

[7] K. Jayaprakash and S. P. Balamurugan, "Design of Optimal Multilevel Thresholding based Segmentation with AlexNet Model for Plant Leaf Disease Diagnosis," in 2022 4th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), 2022, pp. 1473–1479. doi: 10.1109/ICSSIT53264.2022.9716233.

[8] V. Kukreja, R. Sharma, and R. Yadav, "Improving Citrus Farming Through Efficient and Accurate Diagnosis of Lemon Citrus Canker Disease with Deep Learning," in 2023 4th International Conference for Emerging Technology (INCET), 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/INCET57972.2023.10170174.

[9] A. Pramanik, A. Zabed Khan, A. A. Biswas, and M. Rahman, "Lemon Leaf Disease Classification Using CNN-based Architectures with Transfer Learning," in 2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCCNT51525.2021.9579586.

[10] R. Gupta, M. Kaur, N. Garg, H. Shankar, and S. Ahmed, "Lemon Diseases Detection and Classification using Hybrid CNN-SVM Model," in 2023 Third International Conference on Secure Cyber Computing and Communication (ICSCCC), 2023, pp. 326–331. doi: 10.1109/ICSCCC58608.2023.10176828.

[11] M. Shaheen, "Lemon Leaf Disease Dataset (LLDD)." Accessed: Feb. 26, 2025. [Online]. Available: https://www.kaggle.com/datasets/mahmoudshaheen1134/lemon-leaf-disease-dataset-lldd.

[12] F. Konidaris, T. Tagaris, M. Sdraka, and A. Stafylopatis, "Generative Adversarial Networks as an Advanced Data Augmentation Technique for MRI Data," in VISIGRAPP, 2019.

[13] I. Goodfellow et al., "Generative Adversarial Networks," Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 3, Jun. 2014, doi: 10.1145/3422622.

[14] A. Bisht, K. Rawat, J. P. Bhati, S. Vats, V. Sharma, and S. Singh, "Generating Images Using Vanilla Generative Adversarial Networks," in 2024 4th International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences (ICTACS), 2024, pp. 463–468. doi: 10.1109/ICTACS62700.2024.10840720.

[15] R. Gupta and V. Gupta, "Performance Analysis of Different GAN Models: DC-GAN and LS-GAN," in 2021 7th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC), 2021, pp. 222–227. doi: 10.1109/ICSC53193.2021.9673478.

[16] Mohebbanaaz, M. Jyothirmai, K. Mounika, E. Sravani, and B. Mounika, "Detection and Identification of Fake Images using Conditional Generative Adversarial Networks (CGANs)," in 2024 IEEE 16th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), 2024, pp. 606–610. doi: 10.1109/CICN63059.2024.10847379.

[17] Google, "Google Colab," Google collaboratory. Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: https://colab.research.google.com/.

Multidisciplinario
e
ingenierías
Ingeniantes

Comparativa de eficacia de los modelos de redes neuronales convolucionales UNet y PSPNet en la segmentación semántica de las hojas y frutos de plantas de jitomate

RESUMEN: Las enfermedades, plagas y deficiencias nutricionales en las plantas se detectan en las hojas y frutos. La detección precisa y no invasiva usando Deep learning mediante la segmentación semántica, que clasifica cada píxel de una imagen en clases mediante algún modelo de rede neuronal convolucional. En esta investigación se implementan y comparan los modelos UNet y PSPNet para segmentar píxeles de imágenes con plantas de jitomate en las clases: hojas, frutos o fondo. Los modelos se eligieron por su capacidad para capturar detalles finos y robustez en escenarios complejos. Un aporte distintivo es la clasificación multiclase, en comparación con una segmentación binaria. El rendimiento se evaluó con métricas como Accuracy, Precision, Recall, F1 e IoU. UNet presentó un promedio del 89.66% al segmentar hojas y 88.25% en frutos, mientras PSPNet obtuvo 87.50% y 81.34%, respectivamente. Los resultados resaltan el potencial de los modelos UNet y PSPNet para aplicaciones prácticas en agricultura de precisión, permitiendo la monitorización y manejo eficiente de cultivos mediante segmentación semántica de las hojas y frutos de los cultivos de jitomate.

PALABRAS CLAVE: Agricultura de Precisión, Deep Learning, Redes Neuronales Convolucionales Segmentación Semántica, Desempeño.

Colaboración
Juan Pablo Guerra Ibarra, Tecnológico Nacional de México campus Zamora; Francisco Javier Cuevas de la Rosa, Centro de Investigaciones en Óptica A.C; Lorenzo Rene Rojas Ruiz, Tecnológico Nacional de México, campus Zamora

Fecha de recepción: 07 de noviembre 2025
Fecha de aceptación: 12 de noviembre de 2025

ABSTRACT: Diseases, pests, and nutritional deficiencies in plants are detected in leaves and fruits. Accurate and non-invasive detection using deep learning through semantic segmentation, which classifies each pixel of an image into classes using a convolutional neural network model. In this research, the UNet and PSPNet models are implemented and compared to segment pixels from images of tomato plants into the following classes: leaves, fruits, or background. The models were chosen for their ability to capture fine details and their robustness in complex scenarios. A distinctive contribution is the multi-class classification, as opposed to binary segmentation. Performance was evaluated using metrics such as Accuracy, Precision, Recall, F1, and IoU. UNet averaged 89.66% when segmenting leaves and 88.25% for fruits, while PSPNet obtained 87.50% and 81.34%, respectively. The results highlight the potential of the UNet and PSPNet models for practical applications in precision agriculture, enabling efficient crop monitoring and management through semantic segmentation of tomato crop leaves and fruits.

KEYWORDS: Precision Agriculture, Deep Learning, Convolutional Neural Networks, Semantic Segmentation, Performance.

INTRODUCCIÓN

La agricultura es una actividad fundamental para la subsistencia humana, ya que gran parte de los alimentos que se consumen son generados por este medio [1], [2]. La experiencia del agricultor es fundamental en los procesos de riego, fertilización, detección de enfermedades y plagas. Sin embargo, la naturaleza humana puede llevar a procesos ineficientes. Durante el siglo XXI, la agricultura ha experimentado un gran desarrollo tecnológico en busca de mejorar la cantidad, calidad de los alimentos producidos, reducir costos y el impacto ambiental [3].

En los últimos años el uso de la Inteligencia Artificial (IA) y otras tecnologías aplicados al cultivo de la tierra han creado el concepto de Agricultura de Precisión (AP) [4]. Entre los objetivos de la AP destaca el proporcionar a los cultivos los recursos necesarios para su adecuado desarrollo, mejorando la relación costo-beneficio.

Los algoritmos de Deep Learning (DL) tienen un lugar importante en la AP. Un enfoque particular de DL consiste en el uso de diferentes modelos de Redes Neuronales Convolucionales (RNC) con variados objetivos [5]. En AP las RNC se han usado para apoyar diversas tareas de los agricultores. Wang [6] las empleo en la detección de enfermedades presentes en las hojas de árboles de peras, Latif [7] las uso RNC para la detección de condiciones no deseadas en plantíos de arroz. Shoaib [8] implemento las RNC para la detección y segmentación de plagas en hojas de tomate. De igual manera Wei [9] las implemento para la detección de frutos maduros en cultivos de tomate.

La Segmentación Semántica (SS) es el empleo de RNC para clasificar cada píxel de una imagen en una clase en particular [10], [11]. En la AP la SS se ha implementado por diferentes autores, por ejemplo, Kang presento un método de SS de ramas y manzanas utilizando un modelo de tipo piramidal [12]. Ni [13] trabajó con cultivos de arándanos para determinar el grado de madurez en imágenes con un fondo contrastado. Majeed [14] empleó los modelos de RNC FCN, VGG-16 y SegNet-VGG-16 para segmentar los tallos de las plantas de uva y tener un parámetro de control sobre su crecimiento.

Este trabajo se presenta y describen las etapas de entrenamiento y análisis de resultados de dos modelos de RNC UNet y PSPNet para realizar SS de las hojas y frutos de plantas de jitomates cultivadas en condiciones semihidropónicas.

La mayoría de los métodos descritos procesan imágenes adquiridas en condiciones de laboratorio y se centran en una clasificación binaria entre fondo y objeto de interés. Esto plantea interrogantes respecto al comportamiento de estos y otros métodos al aplicarse a imágenes provenientes de ambientes agrícolas reales, la viabilidad de efectuar una clasificación multiclase y cuál de todos los modelos disponibles ofrece el mejor desempeño en métricas de rendimiento como la F1-Score e IoU en las condiciones mencionadas.

En el contexto descrito anteriormente son dos las aportaciones de este trabajo. La primera es el uso de imágenes tomadas en condiciones no controladas, donde variables como iluminación, ángulos de toma y oclusiones de la lente no se controlan. Este enfoque representa un escenario más cercano a las aplicaciones reales en campo. El segundo aporte consiste en abordar la tarea de clasificación multiclase para distinguir hojas, frutos y fondo. Para potenciar el entrenamiento y resultado de los modelos de RNC UNet y PSPNet, además se implementa la técnica de Transfer Learning (TL).

La organización del documento es la siguiente: la Sección 2 describe los recursos utilizados durante el entrenamiento y la experimentación, incluyendo el software, hardware, conjunto de imágenes, su preprocesamiento y los valores de los hiperparámetros empleados. La Sección 3 presenta y analiza los resultados obtenidos por los modelos. Finalmente, la Sección 4 expone las conclusiones de la investigación.

MATERIAL Y MÉTODOS

La implementación de RNC para realizar tareas de SS requiere de elementos indispensables como lo es el conjunto de imágenes a procesar y las máscaras o anotaciones en donde se identifique lo que se desea aprenda la RNC. Existen otros componentes que es preferible contar con ellos como lo son tarjetas de video más no son indispensable.

Características del hardware y software empleados.
La implementación de los modelos de RNC se realizó con las características hardware y software listadas a continuación:

Fabricante: ASUSTeK COMPUTER INC., China.
Modelo: X510UNR
Procesador: Inte Core™ i7-8550U CPU @ 1.80GHz × 8.
RAM: 16 GB.
Tarjeta de video: NVIDIA® GeForce® 150MX.
Sistema operativo: Ubuntu 22.04.2 LTS 64 bits.
Versión Cuda tool kit: 10.1.243.
Versión Cudnn: 7.6.5.
Versión Tensorflow: 2.4.1.
Versión Keras: 2.4.3.
Versión OpenCV: 4.7.0

Conjunto de imágenes

El proceso de entrenamiento de los modelos de RNC se realizó con un conjunto de imágenes de cultivos de tomates rojos en invernaderos, el cual es de acceso público desde el link: https://www.kaggle.com/datasets/andrewmvd/tomato-detection [15]. El sitio de descarga no proporciona información referente a las condiciones de captura de las imágenes, sin embargo, se infiere por la diversidad entre ellas que no hay condiciones de captura controladas como lo es la iluminación, ángulo de captura de las imágenes y no se hace mención del tipo de dispositivo de captura empleado. El conjunto de imágenes consta de 895 elementos, de los cuales se seleccionaron aleatoriamente 300, y fueron asignas 180, 60 y 60 imágenes para formar los conjuntos de Entrenamiento, Validación y Prueba, el número de imágenes es acotado por el tiempo requerido durante el etiquetado. El tamaño de la muestra es de un 34% del total de imágenes. La distribución de las cantidades de imágenes en los conjuntos de Entrenamiento, Valida-

ción y Prueba se realizó con base en lo reportado en literatura, 60%, 20% y 20% respectivamente. La asignación de las imágenes y sus máscaras a los conjuntos se realizó empleando la función de tensorflow Split. Disponible en Google Drive [16].

Etiquetado de imágenes

El etiquetado o marcado de objetos de interés en una imagen es un proceso previo al entrenamiento y prueba de las RNC, también es usado para medir la eficiencia del SS realizado por las RNC. Los píxeles de Las imágenes seleccionadas fueron etiquetados usando la herramienta de marcado web "Computer Vision Annotation Tool" (CVAT), la cual accesible desde el link https://www.cvat.ai/ [17]. Los pixeles de las imágenes se marcaron con colores representativos a las clases de interés del estudio, verde para las hojas, rojo para los frutos y por default negro para el fondo.

El proceso de etiquetado de los píxeles de las imágenes genera una distribución de los píxeles es mostrada en la Figura 1.

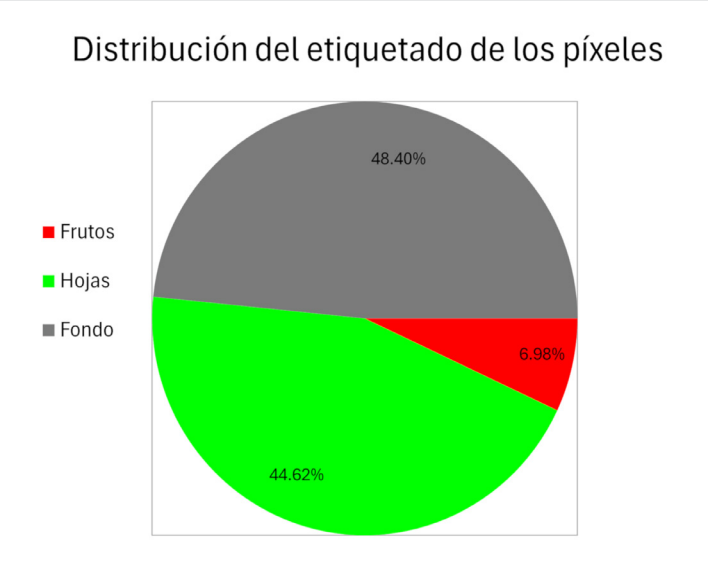


Figura 1. Distribución del etiquetado de los píxeles.
Fuente: Elaboración propia.

Preprocesamiento de imágenes

Las imágenes que conforman los conjuntos de Entrenamiento, Validación y Prueba, así como sus máscaras, tienen dimensiones de 500 × 400 píxeles y formato PNG. Para cumplir los requisitos de entrada de los modelos RNC, es requiere ajustar las dimensiones de las imágenes dependiendo del modelo, dicho ajuste de tamaño se especifica en la sección de los modelos seleccionados. Dentro del preprocesamiento se requiere para llevar a cabo el proceso entrenamiento la conversón de las máscaras a escala de grises, donde cada nivel de gris corresponde a una clase. Los procesos mencionados se realizaron con la librería OpenCV.

La Figura 2 muestra de izquierda a derecha: la Imagen original con plantas de jitomate, máscara generada con el proceso de etiquetado y la imagen resultante del preprocesamiento requerido para entrenar los modelos RNC seleccionados.

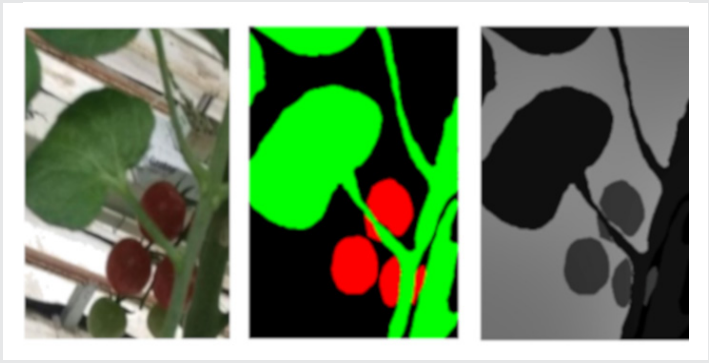


Figura 2. Ejemplos: Imagen original, máscara, preprocesada.
Fuente: Elaboración propia.

Métricas de rendimiento.

Es fundamental medir el rendimiento en la tarea de SS de las hojas y frutos realizada por los modelos RNC. Las métricas de Accuracy, Precision, Recall, F1-Score e IoU se utilizan con la finalidad de tener un parámetro cuantitativo del desempeño de las RNC.

Para definir las métricas mencionadas, es necesario definir cuatro conceptos básicos: Verdaderos Positivos (VP), Verdaderos Negativos (VN), Falsos Positivos (FP) y Falsos Negativos (FN), observe la Figura 3.

Figura 3. Matriz de confusión.
Fuente: Elaboración propia.

Usando la matriz de confusión junto con los resultados de la SS realizada por las RNC y las máscaras de las imágenes es posible asignar cada píxel de una imagen a un cuadrante de la matriz de confusión.

La métrica Accuracy es la relación del número total de píxeles clasificados correctamente entre el total de clasificaciones realizadas por el modelo de RNC y se define de acuerdo con la Ecuación 1.

$$Accuracy = \frac{VP+VN}{VP+VN+FP+FN} . \qquad \text{Ec. (1)}$$

La métrica Precisión representa el ratio entre el número total de PV con respecto al número de positivos predichos, esta es definida por la Ecuación 2.

$$Precision = \frac{VP}{VP+FP} \quad . \qquad \text{Ec. (2)}$$

El número de VP clasificados por el modelo en relación con el número total de clasificaciones positivas es medida con la métrica Recall, la cual se expresa de acuerdo con la Ecuación 3.

$$Recall = \frac{VP}{VP+FN} \quad . \qquad \text{Ec. (3)}$$

F1-Score combina las métricas Precision con Recall y es definida por la Ecuación 4.

$$F1 - Score = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall} . \qquad \text{Ec. (4)}$$

El ratio entre los verdaderos positivos entre el total de clasificaciones correctas se mide en la métrica IoU y es definida en la Ecuación 5.

$$IoU = \frac{VP}{VP + FP + FN} . \qquad \text{Ec (5)}$$

Transfer Learning

En los procesos de entrenamiento con RNC es preferible contar con grandes cantidades de datos. En caso de contar con una cantidad limitada de elementos para realizar el entrenamiento, es conveniente usar una alternativa para aumentar la eficiencia de las RNC. Una forma de hacerlo es implementar lo que se denomina TL, la cual toma el conocimiento adquirido de modelos de RNC entrenados con grandes volúmenes de datos y con hardware altamente especializado y usarlo como una capa adicional antes del modelo final a entrenar.

Modelos de RNC seleccionado

En DL existe una variedad de modelos de RNC, los cuales tienen gran diversidad de objetivos. En este trabajo se implementan los modelos UNet y, PSPNet con un backbone de ResNet mediante TL para mejorar la SS de las hojas y frutos de jitomate en las imágenes descrita.

Modelo de RNC UNet

En 2015 Ronneberger [18], presentó el modelo UNet para realizar la SS de imágenes médicas. Este modelo destaca debido a que el 100% de sus capas son convolucionales.

El modelo UNet consta de dos etapas: la primera se encarga de codificar la información dentro de la imagen para comprender el contexto y la segunda etapa tiene por objeto ampliar simétricamente la información codificada de la primera etapa para localizar con precisión los píxeles mediante una serie de convoluciones transpuestas. La Figura 4 muestra la estructura de RNC UNet.

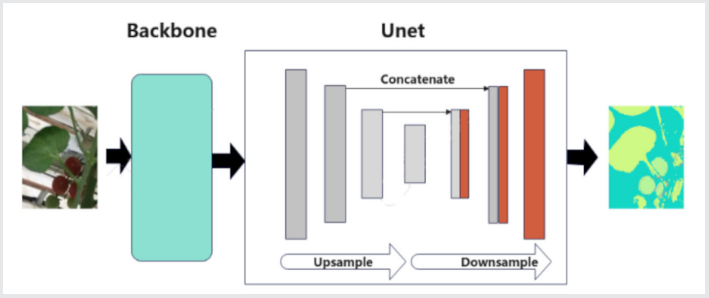


Figura 4. Estructura del modelo UNet con TL.
Fuente: Elaboración propia.

Para el modelo de RNC UNet se requiere ajustar las imágenes pertenecientes a los conjuntos de Entrenamiento, Validación y Prueba a 256 × 256 píxeles.

Modelo de RNC PSPNet

El modelo de RNC denominado PSPNet, fue presentado por Zhao [19], está compuesto por serie de capas convolucionales profundas, para ser aplicadas en la SS de imágenes de entornos urbanos. El modelo PSPNet integra un módulo de agrupación piramidal para aumentar la información contextual en el proceso de segmentación. La estructura básica del modelo se observa en la Figura 5.

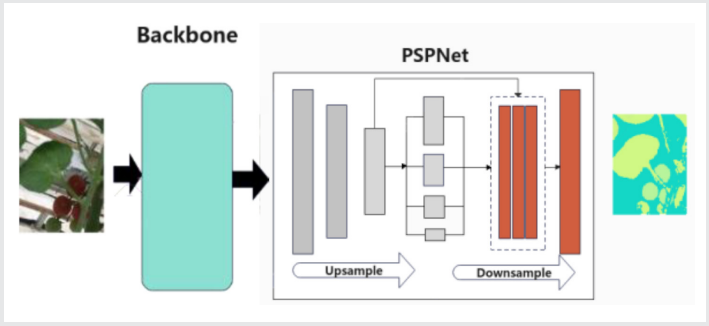


Figura 5. Estructura del modelo PSPNet con TL.
Fuente: Elaboración propia.

Se redimensionaron las imágenes que conforman los conjuntos de Entrenamiento, Validación y Prueba a 384 × 576 píxeles necesaria para cumplir con la configuración del modelo PSPNet.

La Figura 4 y Figura 5 muestran el backbone del modelo ResNet antes de las RNC seleccionadas. Este conocimiento o pesos del backbone están disponibles en la página web oficial de Keras, accesible desde el link: https://keras.io/api/applications/ [20].

Entrenamiento de los modelos

El objetivo del proceso de entrenamiento es permitir que el modelo de RNC generalice la información proporcionada por el etiquetado de las clases y posteriormente marque los píxeles de las imágenes del conjunto de Prueba, en nuestro caso, es asignar cada píxel a una de las tres clases de interés.

El proceso de entrenamiento ajusta los pesos que conectan las capas convoluciones con que está construido el modelo de RNC. El comportamiento de esta etapa controla con los valores de los hiperparámetros de entrenamiento. La configuración empleada de hiperparámetros es la siguiente:

Función de perdida: Categorical Cross-Entropy.
Optimizador usado: Adam
Épocas: 75.
Tasa de aprendizaje: 0.05.
BATCH: 16.
encoder_freeze: True.
Cantidad de elementos en los requeridos conjuntos:
Entrenamiento 180.
Validación 60
Prueba 60.

Los valores de los hiperámetros se determinaron en base a las siguientes consideraciones: la función de pérdida Categorical Cross-Entropy es adecuada para segmentación multiclase. El optimizador Adam proporciona un entrenamiento eficiente y estable. Se definieron 75 épocas para asegurar la convergencia sin sobreajuste.

La tasa de aprendizaje fue establecida con mediante experiencia, no se usó sheduler para adaptar el valor asignado. Él tamaño de batch de 16 es debido a la capacidad hardware empleado. Finalmente, el congelamiento del encoder aprovecha pesos preentrenados en ResNet, facilitando el aprendizaje ante un conjunto de datos reducido. Es importante mencionar que no se utilizó técnica alguna referente al early stopping.

RESULTADOS

El entrenamiento de los modelos UNet y PSPNet se realizó con los hiperparámetros y conjuntos de imágenes mencionados anteriormente. La Figura 6 y Figura 7 muestran el comportamiento de la función Accuracy resultado del proceso de entrenamiento con las imágenes de los conjuntos de Entrenamiento y Validación con las modelos de RNC UNet y PSPNet respectivamente.

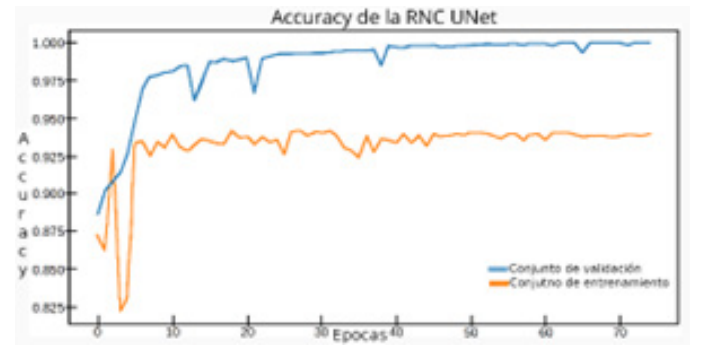


Figura 6. Comportamiento del Accuracy de la RNC PSPNet. Fuente: Elaboración propia.

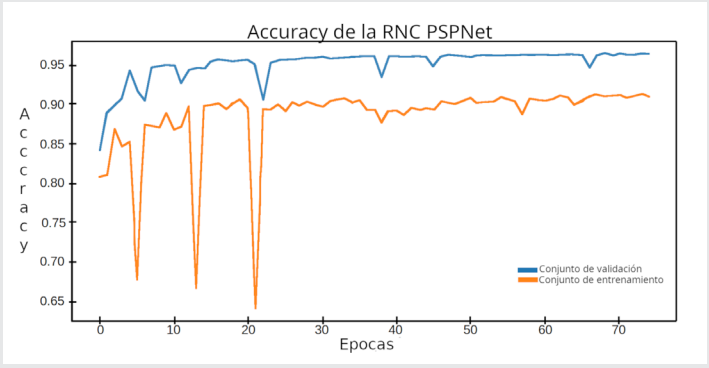


Figura 7. Comportamiento del Accuracy de la RNC PSPNet. Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de la función Accuracy en el proceso de entrenamiento mostrado en la Figura 6 y Figura 7 para las RNC UNet y PSPNet, se aprecia una serie de saltos en las primeras 20 épocas, estabilizándose en el resto del proceso de aprendizaje de los patrones de hojas y frutos. Cuantitativa ambos modelos alcanzan en el conjunto de entrenamiento valores superiores a 0.95, mientras que el rendimiento es inferior con el conjunto de validación, lo que es considerado como un comportamiento normal en el proceso de entrenamiento.

Un ejemplo del resultado de la SS realizada por ambos modelos se muestra en la Figura 8.

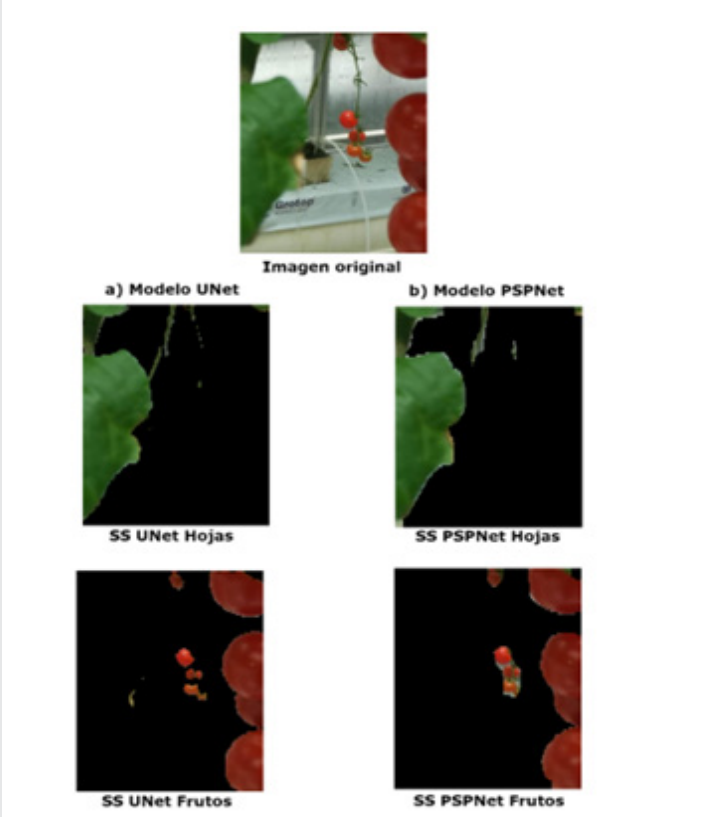


Figura 8. Ejemplos de SS realizada por los modelos. a) Resultados de la SS del modelo UNet. b) Resultado de la SS del modelo PSPNet.
Fuente: Elaboración propia

La Tabla 1 muestra los resultados cuantitativos con las métricas de desempeño en la SS de las imágenes del conjunto de Prueba.

Tabla 1 Resultados de las métricas de rendimiento al segmentar las imágenes del conjunto de prueba.

Precision	85.09%	79.21%	86.04%	84.47%
Recall	93.19%	82.84%	95.86%	91.97%
F1-score	87.59%	80.13%	89.58%	87.70%
IoU	80.19%	68.56%	83.20%	78.90%
Promedio	87.50%	81.34%	89.66%	88.25%

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 1, muestran un desempeño superior del modelo UNet en relación con el modelo PSPNet en la SS de las imágenes del conjunto de Prueba.

De la Tabla 2 a la Tabla 5 muestran datos de la prueba t de Student para muestras emparejadas de dos colas con una confiabilidad del 95% (α=0.05), realizado sobre los valores F1-Score e IoU obtenidos en la SS realizada por los modelos probados.

El análisis estadístico basado en pruebas t emparejadas de las cuatro Tablas anteriores realizadas sobre las métricas F1-Score e IoU para las clases hojas y frutos demuestra que las diferencias entre las medias los modelos UNet y PSPNet son estadísticamente significativas, dado que los valores p asociados son menores al nivel de significancia α=0.05. Lo anterior reafirma la superioridad del modelo UNet en SS de hojas y frutos en imágenes de plantas de jitomate.

Tabla 2 Prueba t Student emparejada métrica F1-Score SS Hojas.

T Student métrica F1 SS de Hojas		
Parámetro	PSPNet	UNet
Media	87.59	89.58
Varianza	223.64	204.22
Observaciones	60	60
Diferencia Hipotética media	0	
Estadístico	**Valor**	
Estadístico t	-4.26	
Grados de libertad	59	
Valor critico t 2 colas	7.99E-05	
P-valor 2 colas	2.00	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3 Prueba t Student emparejada métrica IoU SS Hojas.

T Student métrica IoU SS de Hojas		
Parámetro	PSPNet	UNet
Media	80.19	83.20
Varianza	303.69	277.04
Observaciones	60	60
Diferencia Hipotética media	0	
Estadístico	**Valor**	
Estadístico t	-4.20	
Grados de libertad	59	
Valor critico t 2 colas	9.91E-05	
P-valor 2 colas	2.00	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4 Prueba t Student emparejada métrica F1-Score SS Frutos.

T Student métrica F1 SS de frutos		
Parámetro	PSPNet	UNet
Media	80.13	87.70
Varianza	167.15	61.71
Observaciones	60	60
Diferencia Hipotética media	0	
Estadístico	**Valor**	
Estadístico t	-6.07	
Grados de libertad	59	
Valor critico t 2 colas	1.03E-07	
P-valor 2 colas	2.00	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5 Prueba t Student emparejada métrica IoU SS Frutos.

T Student métrica IoU SS de frutos		
Parámetro	PSPNet	UNet
Media	68.56	78.90
Varianza	263.50	137.92
Observaciones	60	60
Diferencia Hipotética media	0	
Estadístico	**Valor**	
Estadístico t	-7.01	
Grados de libertad	59	
Valor critico t 2 colas	2.86E-09	
P-valor 2 colas	2.00	

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

La comparación cuantitativa entre los modelos UNet y PSPNet demuestra que el modelo UNet supera a PSPNet en métricas clave. Para la SS de hojas, UNet alcanzó un promedio de 89.58% en F1-Score y 83.20% en IoU, superiores a los 87.59% y 80.19% obtenidos por el modelo PSPNet, respectivamente. En la SS de frutos, UNet reportó un promedio de 87.70% en F1-Score y 78.90% en IoU, superando al modelo PSPNet con 80.13% y 68.56% respectivamente. Además, las pruebas t de Student confirman estadísticamente la superioridad de las medias del modelo UNet por sobre PSPNet dentro del contexto manejado en la investigación.

Los resultados y el análisis presentado muestran el potencial de las RNC al realizar la SS de los pixeles de las hojas y frutos en imágenes de plantas de jitomate. Lo anterior plantea la posibilidad de desarrollar un modelo propio basado en la UNet o bien probar con diferentes backbones que mejor los resultados obtenidos.

El mejoramiento del desempeño de los modelos evaluados se abordará con múltiples enfoques. El primero es mejorar el proceso de entrenamiento aumentando el tamaño del conjunto de imágenes disponibles, ya sea etiquetando otras imágenes de la fuente o mediante la técnica de "data augmentation".

Al ser un conjunto pequeño de imágenes se plantea la posibilidad de implementar validación cruzada mediante k-fold para evaluar el desempeño de los modelos probados, permitiendo obtener estimaciones más robustas. De la misma manera se pueden usar algunas técnicas que disminuyan el riesgo de sobre ajuste, como lo es el early stopping y sheduler.

El error humano en el etiquetado de las imágenes al ser un proceso manual es un factor que afecta el entrenamiento de los modelos y al posterior cálculo de las métricas, lo que expone la necesidad de revisar a detalle este proceso de etiquetado, mediante una validación cruzada con varios etiquetadores, guiados por de expertos en fisiología vegetal.

Las imágenes resultantes de la SS de las hojas obtenidas mediante los modelos evaluados pueden ser utilizadas como entradas a otros métodos reportados en la literatura como los cuales realizan la detección e identificación de plagas y enfermedades en las plantas. Estos métodos requieren imágenes de hojas libres de otros elementos que se encuentran de manera habitual como parte del fondo de estas. Por otro lado, las imágenes segmentadas de los frutos de jitomate mediante SS pueden ser empleadas para desarrollar estimadores de cosecha o de grado de madurez de los frutos, contribuyendo así a aplicaciones prácticas en el monitoreo y gestión agrícola.

AGRADECIMIENTOS

Sin el apoyo de las Instituciones que nos permiten contribuir a generar conocimiento no sería posible la presentación de los resultados de esta investigación, por lo anterior se agradece a:
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación.
Tecnológico Nacional de México.
Centro de Investigaciones en Óptica A.C

BIBLIOGRAFÍA

[1] Y. Awasthi, "Press 'A' for Artificial Intelligence in Agriculture: A Review," Int. J. Informatics Vis., vol. 4, no. 3, pp. 112–116, 2020, doi: 10.30630/joiv.4.3.387.

[2] P. P. Ray, "Internet of things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction," J. Ambient Intell. Smart Environ., vol. 9, no. 4, pp. 395–420, 2017, doi: 10.3233/AIS-170440.

[3] G. Mohyuddin, M. A. Khan, A. Haseeb, S. Mahpara, M. Waseem, and A. M. Saleh, "Evaluation of Machine Learning Approaches for Precision Farming in Smart Agriculture System: A Comprehensive Review," IEEE Access, vol. 12, no. May, pp. 60155–60184, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3390581.

[4] R. Bongiovanni, E. C. Mantovani, S. Best, and A. Roel, Introducción a la Agricultura de precisión. Procisur/IICA San José, Costa Rica, 2006.

[5] A. Kamilaris and F. X. Prenafeta-Boldú, "Deep learning in agriculture: A survey," Comput. Electron. Agric., vol. 147, no. July 2017, pp. 70–90, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.compag.2018.02.016.

[6] H. Wang, J. Ding, and S. He, "MFBP-UNet: A Network for Pear Leaf Disease Segmentation in Natural Agricultural Environments," Plants, vol. 12, no. 18, p. 3209, Sep. 2023, doi: 10.3390/plants12183209.

[7] G. Latif, S. E. Abdelhamid, R. E. Mallouhy, J. Alghazo, and Z. A. Kazimi, "Deep Learning Utilization in Agriculture: Detection of Rice Plant Diseases Using an Improved CNN Model," Plants, vol. 11, no. 17, p. 2230, Aug. 2022, doi: 10.3390/plants11172230.

[8] M. Shoaib, T. Hussain, and B. Shah, "Deep learning-based segmentation and classification of leaf images for detection of tomato plant disease," Front. Plant Sci., vol. 13, no. October, pp. 1–18, Oct. 2022, doi: 10.3389/fpls.2022.1031748.

[9] J. Wei et al., "Tomato ripeness detection and fruit segmentation based on instance segmenta-

tion," Front. Plant Sci., vol. 16, no. May, pp. 1–19, 2025, doi: 10.3389/fpls.2025.1503256.

[10] S. Asgari Taghanaki, K. Abhishek, J. P. Cohen, J. Cohen-Adad, and G. Hamarneh, "Deep semantic segmentation of natural and medical images: a review," Artif. Intell. Rev., vol. 54, no. 1, pp. 137–178, Jan. 2021, doi: 10.1007/s10462-020-09854-1.

[11] S. Hao, Y. Zhou, and Y. Guo, "A Brief Survey on Semantic Segmentation with Deep Learning," Neurocomputing, vol. 406, pp. 302–321, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.neucom.2019.11.118.

[12] H. Kang and C. Chen, "Fruit Detection and Segmentation for Apple Harvesting Using Visual Sensor in Orchards," Sensors, vol. 19, no. 20, p. 4599, Oct. 2019, doi: 10.3390/s19204599.

[13] X. Ni, C. Li, H. Jiang, and F. Takeda, "Deep learning image segmentation and extraction of blueberry fruit traits associated with harvestability and yield," Hortic. Res., vol. 7, no. 1, p. 110, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41438-020-0323-3.

[14] Y. Majeed, M. Karkee, Q. Zhang, L. Fu, and M. D. Whiting, "Determining grapevine cordon shape for automated green shoot thinning using semantic segmentation-based deep learning networks," Comput. Electron. Agric., vol. 171, no. November 2019, p. 105308, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105308.

[15] "Tomato Detection | Kaggle." https://www.kaggle.com/datasets/andrewmvd/tomato-detection (accessed Oct. 21, 2022).

[16] "DataSet - Google Drive." https://drive.google.com/drive/folders/1a16xRsQaEyVVe3g-b5K46aRBSjRJhJ3iv (accessed Nov. 06, 2025).
[17] "CVAT." https://www.cvat.ai/ (accessed Oct. 21, 2022).

[18] W. Weng and X. Zhu, "INet: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation," IEEE Access, vol. 9, pp. 16591–16603, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3053408.

[19] H. Zhao, J. Shi, X. Qi, X. Wang, and J. Jia, "Pyramid Scene Parsing Network," in 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Jul. 2017, vol. 2017-Janua, pp. 6230–6239, doi: 10.1109/CVPR.2017.660.

[20] "Keras: the Python deep learning API." https://keras.io/ (accessed Mar. 09, 2022).

Ciencias de la Computación

Ingeniantes

Preservación de la diversidad en algoritmos evolutivos mediante la asignación de género

RESUMEN: Uno de los principales desafíos en los algoritmos evolutivos es la pérdida de diversidad genética a lo largo de las generaciones, lo cual puede conducir a una convergencia prematura y a soluciones subóptimas.

En este trabajo se propone una estrategia basada en la asignación de género a los individuos en la Programación Genética, con el objetivo de preservar la diversidad poblacional mediante una reproducción estructurada y equilibrada. A diferencia de la Programación Genética convencional, en la que los individuos se cruzan sin restricciones de apareamiento, nuestra propuesta empareja exclusivamente a los de género masculino con los de género femenino.

Se evaluó la estrategia propuesta en comparación con la Programación Genética tradicional en problemas de clasificación y regresión. Los resultados mostraron un rendimiento superior de la estrategia propuesta, lo que sugiere que la asignación de géneros y el emparejamiento controlado ayudan a preservar la diversidad genética. No obstante, serán necesarios más experimentos para confirmar estos resultados.

PALABRAS CLAVE: Algoritmos Evolutivos, Asignación de género, Convergencia Prematura, Diversidad, Programación Genética.

Colaboración
Luis Antonio Ibarra Flores; Lino Alberto Rodríguez Coayahuitl, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada / Unidad Académica Tepic.

Fecha de recepción: 07 de noviembre 2025
Fecha de aceptación: 12 de noviembre de 2025

ABSTRACT: One of the main challenges in evolutionary algorithms is the loss of diversity across generations, which can lead to premature convergence and suboptimal solutions.

This work proposes a strategy based on assigning genders to individuals in Genetic Programming, with the goal of preserving population diversity through structured and balanced reproduction. Unlike conventional Genetic Programming, in which individuals mate without restrictions, the proposed approach pairs exclusively male and female individuals.

The proposed strategy was evaluated in comparison with traditional Genetic Programming on classification and regression problems. The results showed superior performance of the proposed strategy, suggesting that gender assignment and controlled mating help preserve genetic diversity. Nevertheless, further experiments will be necessary to confirm these results

KEYWORDS: Assignment of genders, Evolutionary Algorithms, Genetic Diversity, Genetic Programming, Premature Convergence.

INTRODUCCIÓN

Los algoritmos bio-inspirados son técnicas computacionales inspiradas en fenómenos naturales, diseñadas para resolver problemas complejos mediante la imitación de los principios de adaptación, cooperación, autoorganización y evolución presentes en la naturaleza. Se agrupan en familias de acuerdo con el fenómeno que emulan; entre las más comunes se encuentran los algoritmos evolutivos, métodos de inteligencia de enjambre y algoritmos inspirados en el cerebro humano [1].

Los algoritmos evolutivos (EA) conforman una familia de técnicas de optimización estocástica inspiradas en los principios de la evolución biológica, como la selección natural y la reproducción, son útiles en problemas complejos, como aquellos de gran dimensionalidad o con espacios de búsqueda no lineales, donde los métodos tradicionales pueden fallar o resultar ineficientes.

Entre los EA existen múltiples variantes, entre las que destacan los algoritmos genéticos (GA), las estrategias evolutivas (ES), evolución diferencial (DE) y la programación genética (GP) [2].

La GP fue introducida por Koza y se caracteriza por representar soluciones como árboles sintácticos que codifican funciones matemáticas o programas simples. Esta estructura la hace especialmente adecuada para tareas como regresión simbólica y clasificación de datos [3].

Un problema común en GP es la pérdida de diversidad genética a medida que la población converge, que a su vez puede provocar convergencia prematura hacia soluciones subóptimas, limitando la capacidad de exploración del algoritmo [4].

En este trabajo se plantea la hipótesis de que la asignación de género a los individuos en la GP contribuye a preservar la diversidad genética y a mitigar la convergencia prematura, lo que puede conducir a un mejor rendimiento del algoritmo. Finalmente, el objetivo de este estudio es implementar y evaluar esta estrategia en problemas de clasificación y regresión, comparándola con la GP tradicional para determinar su eficacia en la preservación de la diversidad y en la calidad de las soluciones obtenidas.

Revisión de la literatura

Investigaciones previas han explorado múltiples enfoques para mantener la diversidad en algoritmos evolutivos; sin embargo, existen pocas propuestas recientes que introduzcan explícitamente la asignación de género en los individuos. La idea se ha abordado como parte de la selección, de la reproducción o como rasgo diferenciador dentro de la población.

Uno de los trabajos más conocidos se propone un esquema de selección sexual basado en la elección femenina. En su enfoque, las hembras eligen a los machos en función de su aptitud, lo que introduce un tipo de presión evolutiva diferente [5]. Por su parte, [6] presenta un método eficiente para incorporar el género como propiedad adicional de los individuos y reporta mejoras de rendimiento en diversos problemas de optimización.

Asimismo, [7] estudia algoritmos genéticos específicos por género, comparando variantes neutrales y diferenciadas y mostrando mejoras de desempeño. De manera complementaria, [8] combina la selección sexual con operadores distintos según el género, generando dinámicas de competencia y cooperación que incrementan la diversidad. Finalmente, [9] ofrece un marco de referencia sobre algoritmos evolutivos, incluyendo conceptos de diversidad y estructuras poblacionales relevantes para diseñar estrategias de preservación de variedad genética.

Las principales contribuciones de la presente investigación son:
a) Planteamiento de un esquema de emparejamiento directo y balanceado por género en GP, ordenado por rangos de fitness.
b) Evaluación comparativa frente a la GP tradicional en problemas de clasificación binaria y regresión, con el objetivo de analizar su eficacia en la preservación de la diversidad y en la calidad de las soluciones obtenidas.

MATERIAL Y MÉTODOS

El método propuesto se basa en la incorporación de género en GP. El proceso general del algoritmo sigue el esquema clásico de GP tradicional, pero con modificaciones clave para la asignación de género, la selección de padres y la preservación de la diversidad. La Figura 1 muestra el diagrama del proceso evolutivo propuesto.

El proceso evolutivo propuesto se organiza en siete etapas: (i) inicialización de la población con asignación balanceada de género, (ii) evaluación de fitness mediante métricas específicas según el tipo de problema, (iii) ordenamiento de los individuos dentro de cada género, (iv) emparejamiento estructurado hombre-mujer según posición de ranking, (v) aplicación de operadores genéticos de cruce y mutación, (vi) asignación de género a la descendencia para mantener el equilibrio, y (vii) generación de la nueva población mediante estrategia elitista balanceada.

Este proceso se repite hasta alcanzar el número máximo de generaciones indicadas.

A continuación, se describen detalladamente cada una de estas etapas.

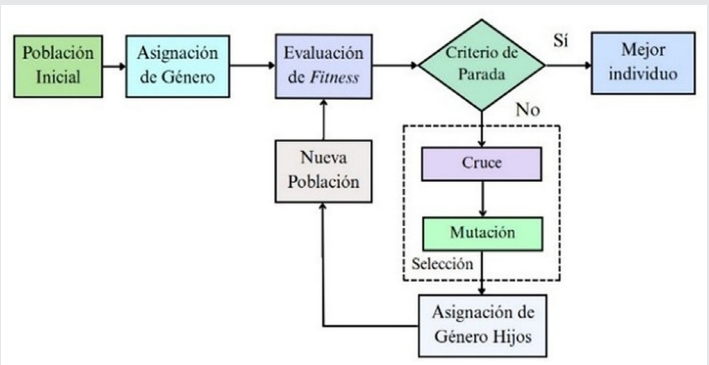


Figura 1. Diagrama general del método propuesto de GP con asignación de género.
Fuente: Elaboración propia.

Inicialización de la población con asignación de género
La población inicial se genera con un tamaño n, asegurando un balance de género desde el comienzo. Este proceso no depende de la aleatoriedad, sino de un mecanismo determinista: se establece de manera fija que el 50% de los individuos sean hombres y el 50% mujeres. De esta forma, no se deja al azar la proporción de géneros, sino que se controla desde el inicio para garantizar el equilibrio.

El criterio seguido consiste en aplicar esta asignación de manera directa y sistemática, dividiendo la población en dos grupos iguales: uno de hombres y otro de mujeres. Cada individuo, independientemente de su posición, se representa como un árbol sintáctico, siguiendo la estructura clásica de la GP tradicional.

Evaluación de fitness
Cada individuo es evaluado utilizando la función de fitness, basada en el error cuadrático medio (MSE) para problemas de regresión y en clasificación se utilizan otras métricas como exactitud.

Selección de padres por ordenamiento
A diferencia de métodos como la selección por torneo o ruleta, en este trabajo se emplea un esquema de selección de padres basado en el ordenamiento de los individuos según su fitness, con un enfoque separado por género.

La forma en que se ordenan depende del tipo de problema: El género masculino y femenino son ordenados de menor a mayor error en problemas de regresión. Por otra parte, en problemas de clasificación son ordenados de mayor a menor exactitud, lo cual es clave para el emparejamiento.

Cruza y Mutación (Emparejamiento estructurado y reproducción)
En esta etapa, se aplica la estrategia de emparejamiento balanceado, en la que los individuos con mejores fitness de cada género se reproducen de manera directa: el mejor hombre se empareja con la mejor mujer, el segundo mejor hombre con la segunda mejor mujer, y así sucesivamente hasta completar la lista.

A cada pareja se le aplica un operador genético, cruce o mutación, según una probabilidad. Estas probabilidades no son las mismas que en el esquema tradicional porque la dinámica evolutiva cambia: en el tradicional, la selección aleatoria de padres obliga a mantener un balance entre exploración (buscar soluciones nuevas mediante cruce) y explotación (aprovechar soluciones ya buenas mediante mutación). En cambio, en el enfoque propuesto se favorece el cruzamiento, para poder aprovechar de manera más amplia la dinámica poblacional propuesta con asignación de género.

Asignación de género a la descendencia
Una vez aplicados los operadores genéticos a los padres, la descendencia recibe un género asignado de forma alternada con el fin de preservar el balance de la población. Es decir, los hijos se etiquetan siguiendo una secuencia hombre–mujer asegurando que ambos géneros se mantengan representados equitativamente en cada generación.

Esta alternancia, además de garantizar un equilibrio, mantiene una distribución ordenada dentro de la población y evita agrupamientos que podrían sesgar la dinámica evolutiva.

Generación de la nueva población
Para formar la nueva generación se implementa una estrategia elitista balanceada por género, diseñada para mantener tanto la diversidad genética como la proporción equitativa entre hombres y mujeres en cada iteración.

La técnica consiste en seleccionar el 25 % de los mejores hombres y el 25 % de las mejores mujeres de la población parental, y complementarlo con el 25 % de los mejores hijos hombres y el 25 % de las mejores hijas mujeres obtenidos en la etapa de reproducción. De esta manera, se conforma el 100 % de la nueva población, asegurando que ambos géneros estén representados equitativamente dentro de los individuos de mejor fitness.

Esta estrategia contribuye a la exploración de nuevas soluciones, ya que evita que un solo grupo genético domine la población. Al mantener diversidad en cada generación se generan combinaciones variadas que amplían la búsqueda y reducen el riesgo de convergencia prematura.

No obstante, existe la posibilidad de que los mejores individuos se crucen repetidamente, dado que la descendencia puede heredar una estructura muy similar al de sus padres. Este efecto se acentuaría en escenarios con un número excesivamente alto de generaciones.

Criterio de parada
El proceso evolutivo se repite hasta que se cumple el siguiente criterio de parada: Se alcanza un número máximo de generaciones y se obtiene al mejor individuo de todas las generaciones.

Herramienta de implementación
La implementación del método propuesto se realizó a partir de la biblioteca TurboGP [10], la cual fue modificada para incluir la asignación de género desde la población inicial y un esquema de emparejamiento estructurado. Con estas modificaciones, los individuos se organizan en grupos de hombres y mujeres, y su reproducción se define de forma determinista en función de su valor de fitness, a diferencia del mecanismo original donde los individuos podían ser seleccionados para cruzamiento con cualquier otro individuo (torneo binario).

Evaluaciones experimentales
En esta sección se describen los conjuntos de datos utilizados en las tareas de clasificación y regresión.

Para la evaluación del método propuesto, se utilizaron tres conjuntos de datos comúnmente usados para evaluar el

desempeño de algoritmos de aprendizaje máquina del repositorio de aprendizaje automático de la Universidad de California Irvine (UCI). Se comparó el método propuesto contra un enfoque de GP tradicional en los siguientes problemas:

a) Conjunto de datos en masas de mamografía:
Este conjunto de datos contiene información clínica de masas detectadas en mamografías. El conjunto consta de 961 muestras y 5 atributos. La clase objetivo es la severidad de la masa obteniendo si es benigna igual a 0 o maligna igual a 1 [11].

b) WDBC (Wisconsin Diagnostic Breast Cancer):
Este conjunto de datos contiene información extraída de imágenes digitalizadas de células mamarias. Cada instancia representa una muestra de tejido, clasificada como benigna (clase 0) o maligna (clase 1). El conjunto incluye 569 muestras y 30 atributos utilizado comúnmente para tareas de clasificación binaria [12].

c) Spambase:
Este conjunto de datos se utilizó debido a que contiene correos electrónicos donde la clase objetivo indica si el correo es spam (1) o no (0) es spam. Consta de 4601 muestras, es un conjunto de datos ampliamente utilizado como pruebas comparativas en problemas de clasificación binaria [13].

Para el conjunto de datos utilizados en problemas de regresión se utilizaron tres funciones sintéticas también típicas en GP para evaluar la estrategia propuesta y el enfoque tradicional [14].

En la Ecuación 1 se presenta una función conocida como función sombrero esta ecuación genera una superficie ondulada en tres dimensiones frecuentemente utilizada como pruebas comparativas.
Función 1:

$$z_1 = \sin\left(\sqrt{x^2 + y^2}\right) \quad \text{Ec. (1)}$$

Se evaluó en un rango de, [– 5, 5] para ambas variables. Se utilizo para las muestras de entrenamiento 2000 y para prueba 400 muestras.

En la Ecuación 2 es una función univariada con comportamiento oscilante y decaimiento exponencial.

Función 2:

$$z_2 = x^3 e^{-x} \cos(x) \sin(x) \left(\sin^2(x) \cos(x) - 1\right) \quad \text{Ec.(2)}$$

Se generaron 1000 muestras aleatorias en el intervalo [0, 2π] para entrenamiento y 200 muestras para prueba.

En la Ecuación 3 la función combina una oscilación sinusoidal con un crecimiento lineal en x, generando una señal modulada.

Función 3:

$$z_3 = 0.3x \ \sin(2\pi x) \quad \text{Ec. (3)}$$

Se utilizaron 1000 muestras aleatorias para el entrenamiento y 200 para la prueba, en el rango [–10, 10] para entrenamiento y prueba.

Dentro de la configuración experimental se emplearon los mismos parámetros tanto para los problemas de clasificación y regresión, manteniendo constante la población, número de generaciones, profundidad máxima y el conjunto de operadores primitivos. En la Tabla 1 se presentan estos valores para ambos métodos. La única diferencia entre ambos métodos radica en las tasas de cruce y mutación. En particular, el enfoque propuesto, denominado AG/GP, emplea una mayor tasa de cruce, lo cual se relaciona directamente con el diseño específico del mecanismo de apareamiento basado en género y con las necesidades evolutivas particulares del modelo.

Tabla 1. Parámetros experimentales para clasificación y regresión.

Parámetro	GP. Trad	AG/GP
Población	1000	
Generaciones	50	
Cruce	0.5	0.7
Mutación	0.5	0.3
Profundidad	7	
Operadores	add, sub, mul, div, x^2, max, min, sin, cos, sqrt	

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, todos los experimentos se realizaron en un equipo de cómputo ASUS TUF GAMING A15, con procesador AMD Ryzen 5 7535HS con Radeon Graphics, 16 GB de RAM y utilizando únicamente la CPU.

RESULTADOS

Cada experimento fue ejecutado 15 veces para analizar el comportamiento promedio del modelo. En cada ejecución se registró el mejor valor de fitness alcanzado, a partir del cual se calcularon el promedio y la desviación estándar para cada conjunto de datos. En problemas de clasificación, un valor promedio más alto indica mejor rendimiento, mientras que, en problemas de regresión, un valor más bajo del MSE refleja mejor rendimiento. En ambos casos, una desviación estándar menor sugiere mayor estabilidad en el comportamiento del modelo.

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para los tres conjuntos de datos de clasificación, donde se observa que el enfoque propuesto supera al modelo

tradicional en dos de los tres conjuntos en términos de rendimiento promedio.

Tabla 2. Resultados de los experimentos de clasificación con 15 ejecuciones por conjunto de datos.

Conjunto de datos	GP. Trad	AG/GP
Mamografía	0.824 ± 0.01	$\mathbf{0.890 \pm 0.02}$
WDBC	0.933 ± 0.02	$\mathbf{0.995 \pm 0.01}$
Spambase	$\mathbf{0.904 \pm 0}$	0.897 ± 0.01

Fuente: Elaboración propia.

Para una mejor visualización de la dispersión y consistencia de los resultados, se incluye el gráfico de caja en la Figura 2, el cual muestra la distribución de la exactitud alcanzada por cada método.

Se observa que, en los casos de Mamografía y WDBC, el enfoque propuesto supera consistentemente al GP tradicional tanto en términos de rendimiento promedio como de menor dispersión en los resultados. En el caso de Spambase, ambos métodos presentan un desempeño similar, aunque el GP tradicional muestra una ligera ventaja.

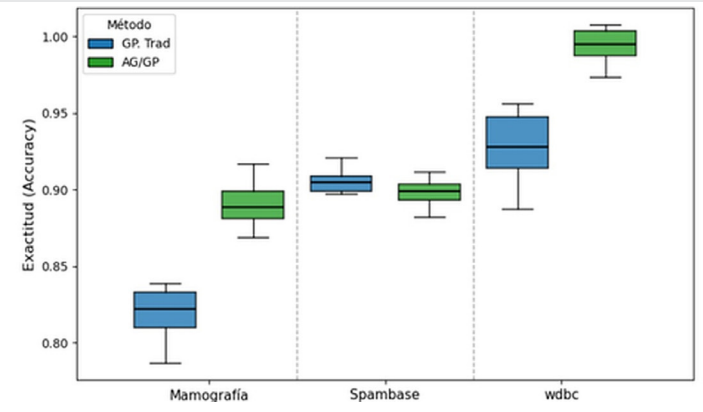


Figura 2: Gráfico de caja para la comparación de los resultados de clasificación.
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los problemas de regresión, los resultados se presentan en la Tabla 3, donde se reportan los valores promedio y desviación estándar del MSE obtenidos tras 15 ejecuciones por función.

Tabla 3. Resultados de los experimentos de regresión con 15 ejecuciones por función.

Conjunto de datos	GP. Trad	AG/GP
Función 1	0.075 ± 0.03	$\mathbf{0.049 \pm 0.03}$
Función 2	$\mathbf{0.006 \pm 0.001}$	0.007 ± 0.003
Función 3	1.074 ± 0.344	$\mathbf{0.964 \pm 0.179}$

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3, se muestran los diagramas de caja correspondiente, los cuales permiten observar la dispersión de los errores y comparar gráficamente el comportamiento de ambos enfoques. Se puede observar que, en las funciones 1 y 3, el modelo con asignación de género obtiene un MSE promedio menor, lo cual indica una mejor capacidad de aproximación.

Además, en estas dos funciones, la dispersión es también más reducida, reflejando una mayor estabilidad evolutiva. En la función 2, en cambio, el GP tradicional obtiene un rendimiento ligeramente superior.

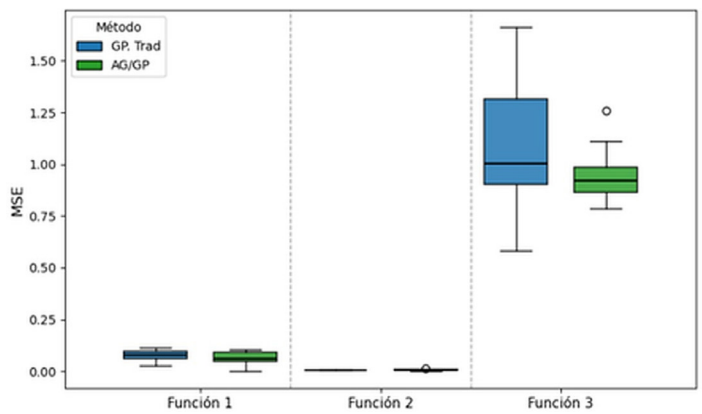


Figura 3: Gráfico de caja para la comparación de los resultados de regresión.
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

La incorporación de la asignación de género en Programación Genética permitió preservar mejor la diversidad poblacional y reducir la convergencia prematura. En los experimentos de clasificación, el enfoque propuesto alcanzó un buen rendimiento en los conjuntos de datos Mamografía y WDBC. En los problemas de regresión, obtuvo mejores resultados en dos de las tres funciones evaluadas. Estos resultados confirman que la asignación por géneros y el emparejamiento estructurado pueden mejorar tanto la calidad como la estabilidad de las soluciones evolutivas frente al enfoque tradicional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por su apoyo en el desarrollo de esta investigación, a través de las Becas Nacionales para estudios de Posgrado 2024-2. Asimismo, se agradece a los doctores Ansel Yoan Rodríguez González y José Agustín Almaraz Damián por sus valiosas revisiones y comentarios que contribuyeron al fortalecimiento de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] S. Somvanshi, M. M. Islam, S. A. Javed, G. Chhetri, K. S. Islam, T. I. Chowdhury, S. B. B. Polock, A. Dutta, and S. Das, "A Comprehensive Survey on Bio-Inspired Algorithms: Taxonomy, Applications,

and Future Directions," 2025. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2506.04238.

*[2] C. A. Coello Coello, G. B. Lamont, and D. A. Van Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. New York, NY, USA: Springer, 2002.*

*[3] J. R. Koza, *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1992.*

*[4] R. N. Abulail, "Premature Avoidance in Genetic Algorithm using Dynamic Mutation Operator," *Journal of Optimization and Control*, vol. 10, no. 1, pp. 45–58, 2025.*

[5] K. Goh, A. Lim, and L. Rodrigues, "Sexual selection for genetic algorithms," Artificial Intelligence Review, vol. 19, pp. 49–66, 2003.

[6] C. Kasten, J. Fahr, and M. Klein, "An efficient way of introducing gender into evolutionary algorithms," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 27, no. 4, pp. 1005–1014, 2023, doi: 10.1109/TEVC.2022.3192481.

[7] Z. Drezner and T. Drezner, "Gender-specific genetic algorithms," in Proc. 34th Western Decision Sciences Institute (WDSI), Vancouver, Canada, Mar. 2005, pp. 411–413.

[8] J. Sánchez-Velazco and J. A. Bullinaria, "Sexual selection with competitive/co-operative operators for genetic algorithms," in Neural Networks and Computational Intelligence, 2003, pp. 191–196.

[9] A. E. Eiben and J. E. Smith, Introduction to Evolutionary Computing. Berlin, Germany: Springer, 2003.

[10] L. Rodriguez-Coayahuitl, A. Morales-Reyes, and H. J. Escalante, "TurboGP: A flexible and advanced Python-based GP library," 2023. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2309.00149.

[11] "Mammographic Mass Data Set," UCI Machine Learning Repository. [Online]. Available: https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/mammographic+mass.

[12] "Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) Data Set," UCI Machine Learning Repository. [Online]. Available: https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Breast+Cancer+Wisconsin+(Diagnostic).

[13] "Spambase Data Set," UCI Machine Learning Repository. [Online]. Available: https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/spambase.

[14] M. Keijzer, "Improving symbolic regression with interval arithmetic and linear scaling," in Genetic Programming. EuroGP 2003, C. Ryan, T. Soule, M. Keijzer, E. Tsang, R. Poli, and E. Costa, Eds., Lecture Notes in Computer Science, vol. 2610. Berlin, Germany: Springer, 2003, pp. 70–82. doi: 10.1007/3-540-36599-0_6.

Multidisciplinario
e
ingenierías
Ingeniantes

Monitoreo de la calidad del aire utilizando imágenes satelitales y SIG: Aplicación de Sentinel-5P y QGIS en Manzanillo, Colima, durante el Incendio del Cerro del Toro en el mes de mayo, 2024

Resumen: El dióxido de nitrógeno (NO_2) es un contaminante atmosférico tóxico, principalmente de origen antropogénico, que tiene efectos adversos significativos en la salud humana y el medio ambiente. Este gas contribuye a la formación de ozono troposférico y lluvia ácida, además de ser un precursor de partículas finas como PM 10 y PM 2.5. La exposición al NO_2 está vinculada a problemas respiratorios y cardiovasculares, afectando especialmente a grupos vulnerables como niños, ancianos y personas con enfermedades preexistentes. Las principales fuentes de emisión de NO_2 son el tráfico vehicular, las actividades industriales y la quema de combustibles fósiles.

Este estudio aplica el uso de imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el monitoreo de la calidad del aire, centrándose en las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO_2) durante el incendio que tuvo lugar en el Cerro del Toro, en Manzanillo, Colima, entre el 20 y el 21 de mayo de 2024. Al emplear tecnologías avanzadas como el satélite Sentinel-5P y el software QGIS, el estudio busca demostrar la eficacia de estas herramientas en la detección y análisis de contaminantes atmosféricos en eventos de alta emisión, proporcionando datos críticos para la gestión ambiental y la salud pública.

PALABRAS CLAVE: Calidad del aire, Dióxido de nitrógeno, imágenes satelitales, QGIS, Sentinel 5P.

Colaboración
Yolanda Rosenda Monzón Herrera; Raúl Teodoro Aquino Santos, Mayren Polanco Gaytan, Universidad de Colima

Fecha de recepción: 22 de agosto de 2025
Fecha de aceptación: 13 de septiembre de 2025

Abstract: Nitrogen dioxide (NO_2) is a toxic air pollutant of primarily anthropogenic origin, with significant adverse effects on both human health and the environment. This gas contributes to the formation of tropospheric ozone and acid rain and is also a precursor to fine particles such as PM 10 and PM 2.5. Exposure to NO_2 is linked to respiratory and cardiovascular problems, particularly affecting vulnerable groups such as children, the elderly, and people with pre-existing conditions. The primary sources of NO_2 emissions are vehicular traffic, industrial activities, and the burning of fossil fuels. Addressing NO_2 emissions is crucial for enhancing air quality and safeguarding both public health and ecosystems

This study investigates the application of satellite imagery and Geographic Information Systems (GIS) for air quality monitoring, with a particular focus on nitrogen dioxide (NO_2) concentrations during the Cerro del Toro wildfire in Manzanillo, Colima, on May 20-21, 2024. By employing advanced technologies, such as the Sentinel-5P satellite and QGIS software, the study aims to demonstrate the effectiveness of these tools in detecting and analyzing air pollutants during high-emission events, thereby providing critical data for environmental management and public health.

KEYWORDS: Air quality, Nitrogen dioxide, satellite images, QGIS, Sentinel 5P.

INTRODUCCIÓN

El dióxido de nitrógeno (NO_2) es un contaminante atmosférico tóxico [1], principalmente de origen antropogénico, que tiene efectos adversos significativos en la salud humana y el medio ambiente, como se destaca en el estudio de Sushil y Jaspal [2]. Las principales fuentes de emisión de NO_2 son el tráfico vehicular, las actividades industriales y la quema de combustibles fósiles. Un monitoreo preciso de las concentraciones de NO_2 es esencial para evaluar la calidad del aire y desarrollar estrategias efectivas para mitigar sus impactos negativos. Este monitoreo no solo ayuda a proteger la salud pública, sino que también contribuye a la formulación de políticas ambientales más informadas y efectivas.

Los incendios forestales son eventos que generan altas emisiones de contaminantes atmosféricos, como el NO_2, los cuales pueden impactar significativamente en la calidad del aire tanto a nivel local como regional. La utilización de imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica (SIG) proporciona herramientas poderosas para el monitoreo de la calidad del aire durante estos eventos. Estas tecnologías permiten una evaluación detallada tanto espacial como temporal de las concentraciones de contaminantes, facilitando la identificación de áreas afectadas y la implementación de medidas de mitigación efectivas.

La integración de imágenes satelitales para la detección en tiempo real de la contaminación se está convirtiendo en una herramienta cada vez más crucial para la gestión de la calidad del aire, especialmente en regiones con infraestructura de monitoreo limitada. Este enfoque permite una evaluación continua y precisa de los niveles de contaminación, lo que es esencial para implementar estrategias de gestión del aire más efectivas [3].

En regiones portuarias y urbanas, como Manzanillo, Colima, la calidad del aire se ha convertido en un desafío ambiental y de salud pública, debido a la convergencia de actividades industriales, el tráfico vehicular y la alta densidad poblacional [4], [5], [8]. En este puerto, de relevancia nacional por su dinamismo comercial, se han identificado contaminantes críticos como dióxido de nitrógeno (NO_2), material particulado (PM10 y PM2.5) y ozono troposférico (O_2), los cuales en diversos episodios superan los valores permitidos por la normatividad ambiental [5]. Esta situación se intensifica durante eventos críticos, como los incendios forestales, que generan incrementos abruptos en la concentración de contaminantes y deterioran significativamente la calidad del aire en la región [2].

Diversos estudios han demostrado que las operaciones portuarias y marítimas, junto con el transporte terrestre asociado, constituyen fuentes críticas de emisiones atmosféricas, situando a Manzanillo entre los puertos de mayor impacto en México por la liberación de NO_2, SO_2, partículas y gases de efecto invernadero [6], [7]. La combustión de combustibles fósiles en buques y vehículos contribuye además a procesos fotoquímicos que favorecen la formación de ozono troposférico, incrementando los riesgos para la salud y el ambiente, lo que evidencia la necesidad urgente de medidas de mitigación en contextos urbanos y portuarios [8].

Si bien existen marcos regulatorios nacionales e internacionales para proteger la salud y el ambiente, las capacidades locales de monitoreo en Manzanillo presentan limitaciones considerables, ya que dependen principalmente de estaciones terrestres con baja cobertura espacial y temporal [7]. Esta situación dificulta obtener datos oportunos y precisos sobre la dinámica de los contaminantes en escenarios de alta emisión, lo que limita la formulación de estrategias de mitigación y prevención, así como la capacidad de respuesta ante emergencias ambientales [6], [7].

El desarrollo de tecnologías avanzadas, como los sistemas satelitales y los SIG, ha transformado el monitoreo atmosférico al permitir observaciones continuas, de amplio alcance y en tiempo casi real [3], [9]. En particular, el satélite Sentinel-5P, equipado con el espectrómetro TROPOMI, ofrece datos hiperespectrales de alta resolución sobre contaminantes clave como NO_2, SO_2, CO, O_2 y CH_4 [11]–[13]. La validación de estos datos es esencial para garantizar su eficacia y traducirlos en políticas ambientales efectivas [10]. Asimismo, la integración de mediciones satelitales con datos terrestres y herramientas SIG posibilita una mejor comprensión de la dinámica de la contaminación y su relación con factores socioeconómicos y demográficos, lo que aporta una base sólida para la formulación de políticas públicas adaptadas a regiones altamente presionadas como Manzanillo [14]–[16].

En este contexto, resulta fundamental replantear la forma en que se evalúa la calidad del aire en este puerto, mediante el uso de herramientas que permitan comprender con mayor detalle las variaciones espaciales y temporales de los contaminantes, fortalecer la toma de decisiones en materia de gestión ambiental y contribuir al cumplimiento de la normatividad vigente, particularmente frente a contingencias como el incendio del Cerro del Toro ocurrido en 2024 [5], [10].

MATERIAL Y MÉTODOS

En el monitoreo de contaminantes en Manzanillo, se emplearon imágenes del satélite Sentinel-5P, que proporciona datos detallados a través de su sensor TROPOMI. Este sensor es capaz de capturar información de alta resolución sobre diversos contaminantes atmosféricos, lo que permite una evaluación precisa de la calidad del aire en la región. La utilización de estas imágenes satelitales es crucial para identificar patrones de contaminación y desarrollar estrategias efectivas de mitigación, especialmente en áreas con infraestructura de monitoreo limitada.

El instrumento de monitoreo troposférico, conocido como TROPOMI, es un espectrómetro pasivo de imágenes de retrodispersión solar que permite la adquisición de imágenes en ocho bandas espectrales [17]. Este avanzado dispositivo cubre múltiples dominios espectrales, que van desde el ultravioleta y el visible hasta el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), como se describe en el estudio [17]. La capacidad de TROPOMI para capturar datos en estas diversas bandas espectrales es crucial para el monitoreo detallado de la composición atmosférica, lo que facilita una mejor comprensión de los procesos troposféricos y contribuye significativamente a la investigación ambiental y climática.

Esta tecnología ha demostrado ser altamente efectiva en la detección de gases como el NO_2, uno de los principales contaminantes que deterioran la calidad del aire en entornos urbanos. Según un estudio reciente, las imágenes satelitales del Sentinel-5P, y en particular los datos proporcionados por el sensor TROPOMI, constituyen una herramienta invaluable para el monitoreo integral y a gran escala de la contaminación del aire [18]. La capacidad de TROPOMI para ofrecer datos precisos y detallados permite a los investigadores y responsables de políticas ambientales evaluar y abordar de manera más efectiva los desafíos relacionados con la calidad del aire.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se utilizan en el monitoreo de la calidad del aire porque permiten integrar, visualizar y analizar de manera espacial y temporal la distribución de contaminantes, ofreciendo un soporte fundamental para la gestión ambiental en contextos urbanos y portuarios [14], [16]. Estas herramientas funcionan mediante la superposición de capas de información, que combinan datos satelitales —como los obtenidos por el instrumento TROPOMI del Sentinel-5P— con registros terrestres, variables socioeconómicas y demográficas, lo que posibilita un análisis integral de la dinámica de la contaminación [10], [15].

En cuanto a sus niveles de aplicación, los SIG operan tanto en escalas locales como regionales y globales. A nivel local, permiten identificar áreas críticas de exposición en ciudades como Manzanillo, vinculando la contaminación atmosférica con factores poblacionales y de infraestructura [14]. A nivel regional, facilitan la evaluación comparativa entre distintas zonas portuarias o industriales, mientras que, en la escala global, los SIG se convierten en herramientas clave para el seguimiento de tendencias y la formulación de políticas ambientales internacionales basadas en evidencia científica [13], [16].
Preprocesamiento de imágenes

Preprocesamiento de imágenes

Se llevó a cabo una proyección de imagen utilizando SNAP (Sentinel Application Platform), un software gratuito desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) diseñado para procesar y analizar imágenes satelitales, especialmente aquellas provenientes de las misiones Sentinel del programa Copernicus. SNAP tiene como objetivo principal facilitar el acceso y tratamiento de datos de observación de la Tierra, lo que es crucial para aplicaciones en medio ambiente, agricultura, gestión de recursos y monitoreo territorial, como se describe en el estudio [4]. La capacidad de SNAP para manejar grandes volúmenes de datos satelitales permite a los investigadores y profesionales del sector optimizar sus análisis y tomar decisiones informadas basadas en datos precisos y actualizados.

El procesamiento y análisis de datos en ArcGIS se lleva a cabo a través de varias etapas sistemáticas. Inicialmente, se realiza el preprocesamiento de las imágenes del satélite Sentinel-5P para corregir cualquier distorsión o artefacto que pueda afectar los resultados, como se ilustra en la Figura 1. Este proceso incluye la calibración radiométrica y la corrección atmosférica de las imágenes, asegurando que los datos reflejen con precisión las concentraciones de contaminantes. La calibración radiométrica y la corrección atmosférica son procesos fundamentales para garantizar la fidelidad y precisión de los datos obtenidos [11], [19]. Estas técnicas aseguran que los valores derivados de sensores como TROPOMI del Sentinel-5P reflejen de manera precisa las condiciones reales de la atmósfera observada [11], [19].

La calibración radiométrica se refiere a la conversión de las señales digitales registradas por los sensores satelitales en valores físicos medibles, como la radiancia, eliminando errores instrumentales o variaciones del sensor [13], [17]. Esto permite que las imágenes sean comparables a lo largo del tiempo y entre diferentes plataformas, mejorando la consistencia de los resultados en estudios ambientales [13], [17].

Por su parte, la corrección atmosférica elimina los efectos que las partículas atmosféricas, los aerosoles y el vapor de agua provocan en la señal registrada por el sensor [12], [18]. Esta corrección es esencial para obtener datos que representen únicamente la reflectancia o concentración del contaminante objetivo, como el NO_2, sin distorsiones inducidas por la atmósfera [12], [18].

Posteriormente, se emplean herramientas analíticas dentro de ArcGIS para aplicar modelos de interpolación y análisis espacial. Esto permite identificar áreas críticas y correlacionar la contaminación con variables socioeconómicas y demográficas, como se observó en el caso del incendio en el Cerro del Toro, en Manzanillo. La capacidad de ArcGIS para integrar y analizar estos datos es crucial para desarrollar estrategias efectivas de gestión ambiental y mitigación de riesgos.

Se emplearon diversas fórmulas para convertir las unidades de mol/m^2 a ppm (partes por millón), que es la

unidad de medida utilizada para expresar concentraciones muy pequeñas de una sustancia dentro de otra. Este proceso de conversión es crucial para garantizar que las concentraciones de contaminantes se presenten en un formato estándar y comprensible, facilitando así la interpretación y comparación de los datos.

Ecuaciones

Concentración molar superficial (mol/m^2). Esta unidad es utilizada inicialmente por los sensores satelitales como TROPOMI, que miden la cantidad de NO_2 por unidad de superficie en una columna atmosférica [19].

Para convertir moles por metro cuadrado (mol/m^2) a partes por millón (ppm) de dióxido de nitrógeno (NO_2), primero se debe convertir la concentración molar en concentración en masa (g/m^2), y luego en ppm. La conversión de mol/m^2 a ppm de NO_2 no es directa, ya que mol/m^2 representa una concentración molar en una superficie, mientras que ppm es una concentración en volumen.

La Ecuación 1 presenta la conversión a concentración volumétrica (mol/m^2). Para convertir mol/m^2 a mol/m^2 se multiplica por la altura de la columna atmosférica considerada. En el estudio se utiliza una altura de 7000 metros (7 km), correspondiente al rango de observación troposférica del sensor [19]. Por ejemplo, si se está considerando una columna de aire con una altura de 'h' metros, la concentración molar en mol/m^2 sería (mol/m^2) * h (m). En este estudio la altura de la columna es de 7 km, es decir 7000m, debido a que TROPOMI realiza un muestreo espacial de 7kmx7km, esto debido a que el NO2 se encuentra en la tropósfera [19].

Para el NO_2 troposférico o el ozono troposférico, Sentinel-5P recupera específicamente concentraciones limitadas a la troposfera (aproximadamente desde la superficie hasta una altitud de 8 a 15 km, según la latitud y la estación). El NO_2 troposférico es el foco principal del monitoreo de la calidad del aire, porque está más cerca de las actividades humanas como el tráfico y la industria. Por lo que se rescata que la altura de la columna para este estudio es de 7km, la operación de 15-8=7.

$$\frac{mol}{m^3} = \frac{mol}{m^2} * Column\ height \qquad \text{Ec. (1)}$$

El siguiente paso fue la conversión a concentración en masa (g/m^2).

Se transforma la concentración molar volumétrica a concentración en masa utilizando la masa molar del NO_2, que es de 46.0055 g/mol [21]:

$$\frac{g}{m^3} = \frac{mol}{m^3} * \ masa\ molar\ del\ NO_2 \qquad \text{Ec. (2)}$$

Y por último fue calcular la ppm, donde se considera a la densidad del NO2 en condiciones estándar, es decir, 0 °C o 273.15 K y 1 atm, aproximadamente 1.697 g/m^2. Para lo anterior se utilizó como referencia la ecuación de los gases ideales en forma de densidad [22]:

$$PV = nRT \qquad \text{Ec. (3)}$$

Pero la densidad p (en g/m^3) es:

$$p = \frac{m}{v} = \frac{nM}{V} \qquad \text{Ec. (4)}$$

Cálculo de densidad del NO_2 (ρ). Para convertir la concentración en masa a ppm, se requiere conocer la densidad del NO_2 en condiciones estándar (0 °C y 1 atm). Esta se obtiene mediante la ecuación de los gases ideales en forma de densidad [22]:

$$p = \frac{PM}{RT} \qquad \text{Ec. (5)}$$

Donde:
ρ: densidad (g/m^2)
P: presión (en Pa = pascales)
M: masa molar (g/mol)
R: constante de los gases = 8.314 J/mol·K
T: temperatura absoluta (K)

Datos:
P=1atm=101325 Pa
T=0ºC=273.15 K
M=46.0055 g/mol
R = 8.314 J/mol·K

Conversión final a ppm. Finalmente, se utiliza la fórmula para convertir la concentración en masa a partes por millón:

$$ppm = \left(concentración\ en\ masa \frac{\frac{g}{m^3}}{densidad\ \ NO_2\ (p)} \right) \qquad \text{Ec. (6)}$$

Sustituyendo la fórmula:

$$p = \frac{(101325Pa)\left(\frac{46.0055g}{mol}\right)}{\left(8.314\frac{J}{mol}\cdot K\right)(273.15K)}$$

$$p = \frac{4664865.288}{2271.0951} \approx 1.697 g/m^3$$

Este conjunto de métricas y conversiones permite interpretar los datos satelitales en un formato utilizable para la evaluación de la calidad del aire, facilitando la comparación con normas ambientales y el análisis de riesgo por exposición a contaminantes [19], [22], [21].

El presente estudio se desarrolló con fines estrictamente académicos. Los datos analizados no fueron reportados a ninguna instancia gubernamental, y su tratamiento se centró en evaluar el comportamiento de los contaminantes desde una perspectiva científica y exploratoria.

Para determinar la concentración en partes por millón (ppm), que es un referente clave según la Norma Oficial

Mexicana (NOM), se considera la NOM-023-SSA1-2021. Esta norma establece un límite máximo para la concentración de dióxido de nitrógeno (NO_2) en el aire de 0.106 ppm, calculado como un promedio de una hora, una vez al año, con el objetivo de proteger la salud de la población [5], [20]. Cabe destacar que esta norma no especifica un límite promedio para un período de 24 horas. Sin embargo, la Norma Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2023, publicada posteriormente, introduce valores normativos para la concentración de NO_2 en el aire, reforzando las medidas de protección a la salud pública [5].

RESULTADOS

El análisis de las imágenes satelitales Sentinel-5P, procesadas con SNAP y ArcGIS y representadas en QGIS, permitió identificar cambios importantes en la concentración de dióxido de nitrógeno (NO_2) en Manzanillo, Colima, al inicio y durante del incendio en el Cerro del Toro (20–21 de mayo de 2024).

Al inicio del incendio (19 de mayo), los niveles de NO_2 se encontraban por encima de los parámetros aceptables, con valores mayores a 0.1 ppm y menores a 0.4, como se observa en la Figura 1 y la Gráfica 1. Así mismo, durante los días 20 y 21 de mayo, coincidiendo con el incendio, se registró un incremento abrupto superior al 300 %, alcanzando hasta 0.503 ppm en algunas zonas específicas (Figuras. 2 y 3; Gráficas. 2 y 3). Estos niveles superan ampliamente el límite de exposición de 0.106 ppm establecido por la NOM-023-SSA1-2021, clasificándose la calidad del aire como “muy mala” o “extremadamente mala”, de acuerdo con la NOM-172-SEMARNAT-2023.

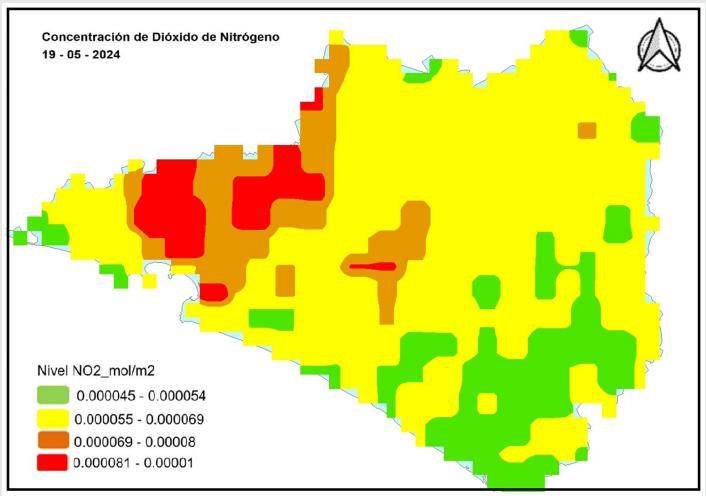
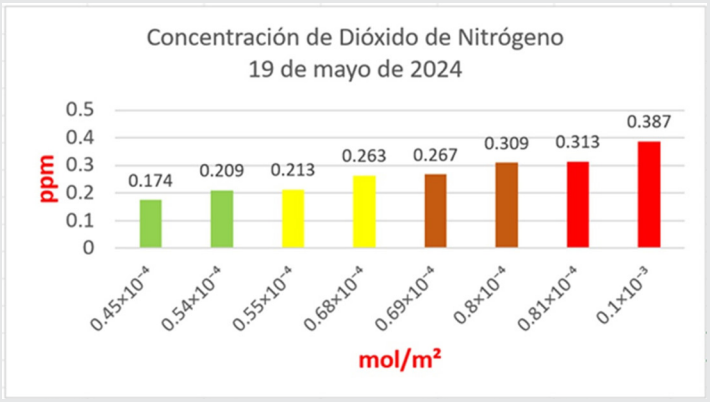


Figura 1: Imagen de la concentración de Dióxido de nitrógeno del 19 de mayo del 2024, antes del incendio en el cerro del Toro, Manzanillo, Colima.
Fuente: Elaboración propia datos e imágenes tomadas de Copernicus browser.

Las imágenes satelitales Figuras 1 a 4 evidencian que las concentraciones más altas se registraron al sur y suroeste del municipio, en concordancia con la dirección predominante del viento. Esto indica que los contaminantes se dispersaron hacia zonas pobladas como el puerto de Manzanillo y colonias aledañas. Asimismo, las gráficas de concentración (Gráficas 1 a 4) muestran picos bien definidos durante el incendio, seguidos de una disminución progresiva en los días posteriores, lo que refleja la dispersión y reducción natural del contaminante conforme se extinguió el fuego. A su vez, la tabla 1 muestra la obtención del índice aire y salud para dióxido de nitrógeno (NO2) y la representación en colores el nivel de riesgo asociado a la calidad del aire de las figuras 1, 2, 3 y 4.



Gráfica 1: Concentración de NO2 en mol/m^2 y en ppm rebasando el límite permitido por la NOM-023-SSA1-2021 y la NOM-172-SEMARNAT-2023, que marcan que es de 0.106 ppm.
Fuente: elaboración propia.

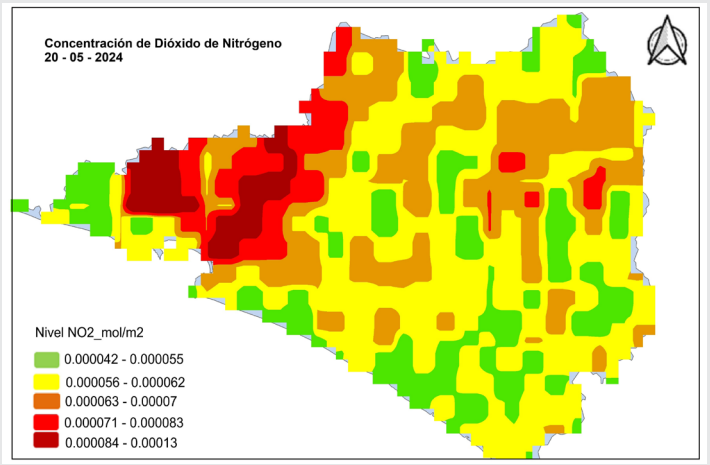
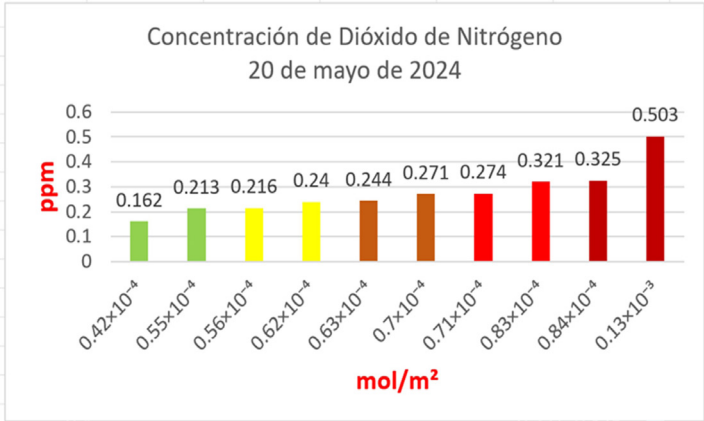


Figura 2: Concentración de Dióxido de nitrógeno del 20 de mayo del 2024, durante el incendio en el cerro del Toro, Manzanillo, Colima.
Fuente: Elaboración propia, datos e imágenes tomadas de Copernicus browser.

En la figura 2, se muestra la mayor concentración de NO_2, teniendo como referencia la Tabla 1 y la Gráfica 1, que muestra, que esta concentración rebasa los límites permitidos por la NOM-023-SSA1-2021.



Gráfica 2: Concentración de NO2 en mol/m² y en ppm rebasando el límite permitido por la NOM-023-SSA1-2021 y la NOM-172-SEMARNAT-2023, que marcan que es de 0.106 ppm. Fuente: Elaboración propia.

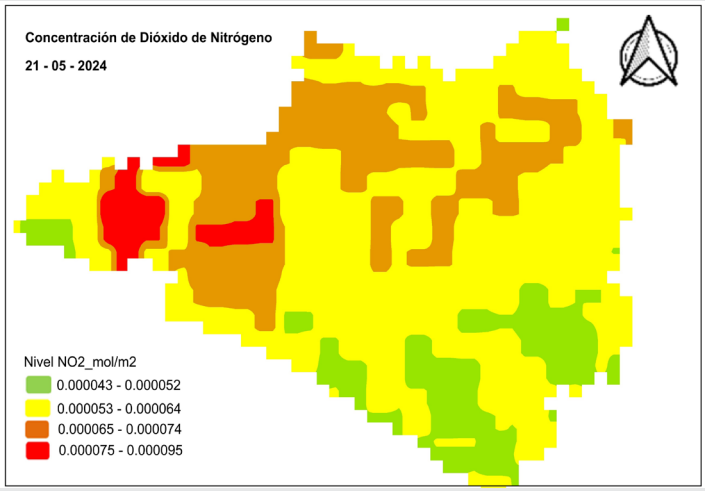
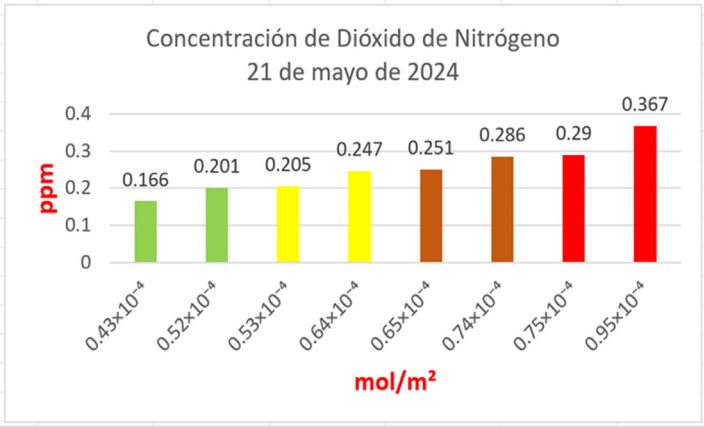


Figura 3: Imagen de la concentración de Dióxido de nitrógeno del 21 de mayo del 2024, antes de extinguir el incendio en el cerro del Toro, Manzanillo, Colima. Fuente: Elaboración propia datos e imágenes tomadas de Copernicus browser.



Gráfica 3: Concentración de NO2 en mol/m² y en ppm rebasando el límite permitido por la NOM-023-SSA1-2021 y la NOM-172-SEMARNAT-2023, que marcan que es de 0.106 ppm. Fuente: elaboración propia.

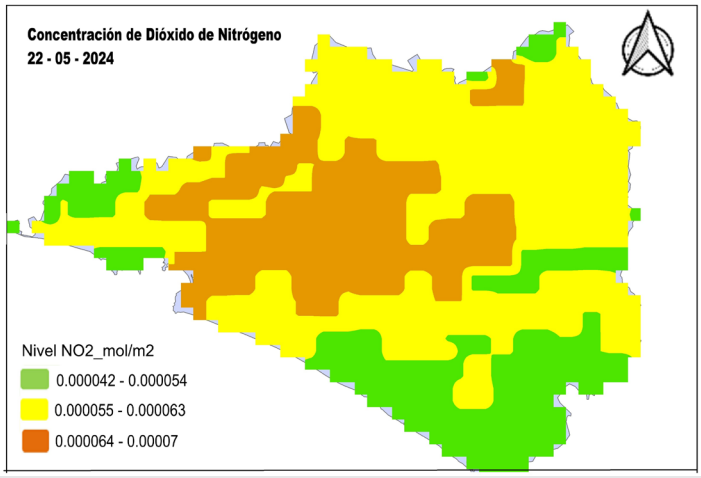
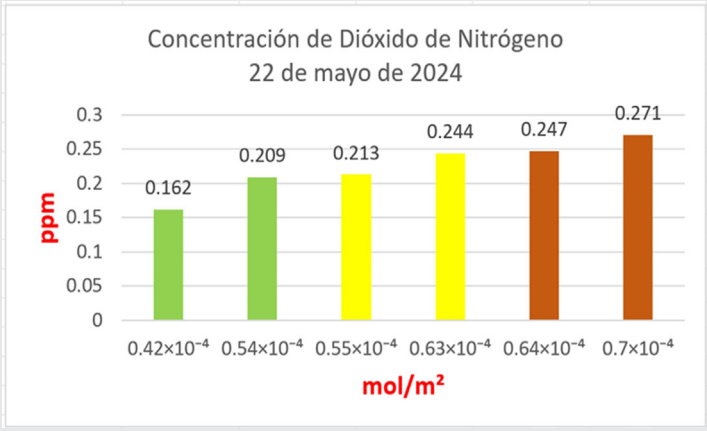


Figura 4: Imagen de la concentración de Dióxido de nitrógeno del 22 de mayo del 2024, antes de extinguir el incendio en el cerro del Toro, Manzanillo, Colima. Fuente: Elaboración propia datos e imágenes tomadas de Copernicus browser.



Gráfica 4: Concentración de NO_2 en mol/m² y en ppm rebasando el límite permitido por la NOM-023-SSA1-2021 y la NOM-172-SEMARNAT-2023, que marcan que es de 0.106 ppm. Fuente: elaboración propia.

La Tabla 1, muestra los rangos de concentración de dióxido de nitrógeno (NO_2) en partes por millón (ppm) y su asociación con niveles de riesgo a la salud, conforme a la NOM-172-SEMARNAT-2023 y a la NOM-023-SSA1-2021, en esta tabla se describen seis categorías de calidad del aire: Buena, Aceptable, No Aceptable, Mala, Muy mala y Extremadamente mala, cada una vinculada con un nivel de riesgo (Bajo, Moderado, Moderado alto, Alto, Muy Alto y extremadamente alto, respectivamente) y representada mediante un código de colores (azul claro, azul, verde, amarillo, naranja y rojo). Esta representación facilita la interpretación visual de los niveles de contaminación observados en las figuras 1, 2, 3 y 4.

Tabla 1: Obtención del índice aire y salud para dióxido de nitrógeno (NO2).

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de dióxido de nitrógeno (NO2) promedio de una hora (ppm)	Color que lo representa
Buena	Bajo	<= 0.053	
Aceptable	Moderado	>0.053 a 0.106	
No aceptable	Moderado alto	>0.106 a 0.160	
Mala	Alto	>0.160 a 0.213	
Muy Mala	Muy Alto	> 0.213 a 0.266	
Extremadamente mala	Extremadamente alto	> 0.266	

Fuente: Elaboración propia en base a la NOM-172-SEMARNAT-2023, SEMARNAT, 2024 y a la NOM-023-SSA1-2021.

RESULTADOS

Discusión

Los resultados confirman la utilidad de las imágenes satelitales y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el monitoreo de la calidad del aire en eventos de alta emisión como incendios forestales. En este caso, el sensor TROPOMI del Sentinel-5P permitió detectar incrementos puntuales y regionales de NO_2 en Manzanillo, validando su efectividad en contextos locales con infraestructura limitada de monitoreo terrestre.

El incremento registrado fue considerable: las concentraciones superaron en más del triple el límite normativo de 0.106 ppm, alcanzando hasta 0.43 ppm. Esto representa un riesgo serio para la salud de la población, particularmente para grupos vulnerables como niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias. Aunque los niveles disminuyeron tras el incendio, se mantuvieron por encima de lo aceptable hasta al menos el 22 de mayo, lo que demuestra que los efectos se prolongan más allá del evento inicial.

La integración metodológica de Sentinel-5P con SNAP, ArcGIS y QGIS no solo permitió identificar el aumento de contaminantes, sino también visualizar su distribución espacial y temporal. Estos hallazgos coinciden con lo planteado por Zhang [3], quien subraya que las tecnologías satelitales ofrecen ventajas clave en regiones con capacidades limitadas de monitoreo terrestre.

En términos ambientales, los resultados muestran que eventos naturales como incendios forestales pueden generar niveles de contaminación comparables o incluso superiores a los de las fuentes industriales tradicionales. Esto enfatiza la necesidad de políticas ambientales que consideren emergencias y escenarios de cambio climático, así como la incorporación sistemática de herramientas como Sentinel-5P en planes municipales y estatales de gestión de la calidad del aire.

Finalmente, aunque este estudio no fue vinculado directamente con políticas públicas ni comunicado a instancias oficiales, aporta bases sólidas para investigaciones futuras. La integración de datos de salud pública con mediciones satelitales podría ayudar a identificar efectos crónicos derivados de exposiciones cortas pero intensas a contaminantes, contribuyendo al diseño de protocolos de alerta temprana y a la planeación urbana y ambiental con fundamento científico.

CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra la eficacia de integrar imágenes satelitales del Sentinel-5P, mediante el sensor TROPOMI, con plataformas de análisis geoespacial como SNAP, ArcGIS y QGIS, para el monitoreo de la calidad del aire en contextos de alta emisión contaminante. La evaluación realizada durante el incendio del Cerro del Toro en Manzanillo, Colima, permitió detectar incrementos sustanciales en las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO_2), superando con creces los límites establecidos por la normatividad mexicana vigente (NOM-023-SSA1-2021 y NOM-172-SEMARNAT-2023).

La metodología empleada permitió una representación detallada, tanto espacial como temporal, de la evolución del contaminante, mostrando su máxima concentración durante el 20 de mayo de 2024 y una dispersión significativa en los días posteriores. Este tipo de análisis es esencial para comprender el comportamiento de los contaminantes atmosféricos durante eventos críticos, y evidencia la necesidad de incorporar herramientas tecnológicas de monitoreo remoto en los planes de gestión ambiental a nivel local y regional.

Asimismo, los hallazgos sugieren un fuerte vínculo entre los eventos de incendios forestales y la degradación de la calidad del aire, con posibles implicaciones directas en la salud de la población expuesta. Por tanto, se recomienda el uso continuo y sistemático de sensores satelitales como Sentinel-5P para fortalecer las redes de monitoreo en zonas con infraestructura limitada, así como para apoyar a las autoridades en la toma de decisiones informadas ante emergencias ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis asesores de tesis, la Dra. Mayren Polanco Gaytán y el Dr. Raúl Teodoro Aquino Santos, que con su motivación y acompañamiento me han permitido la elaboración de este, mi primer artículo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] S. S. Taha, S. Idoudi, N. Alhamdan, R. H. Ibrahim, R. Surkatti, A. Amhamed, and O. F. Alrebei, "Comprehensive review of health impacts of the exposure to nitrogen oxides (NOx), carbon dioxide (CO2), and particulate matter (PM)," Journal of Hazardous Ma-

terials Advances, vol. 19, p. 100771, 2025. doi: 10.1016/j.hazadv.2025.100771.

[2] S. K. Pandey y J. Singh, "Nitrogen dioxide: Risk assessment, environmental, and health hazard," en Hazardous Gases, J. Singh, R. D. Kaushik y M. Chawla, Eds., Academic Press, 2021, pp. 273–288. ISBN: 978-0-323-89857-7. doi: 10.1016/B978-0-323-89857-7.00001-3.

[3] Z. Zhang, D. Leng, Y. Li, X. Gui, Y. Cheng, J. Zhao, Z. Zhang, and A. M. Y. M. Ghias, "Artificial intelligence-driven insights: Precision tracking of power plant carbon emissions using satellite data," Energy Convers. Econ., vol. 5, pp. 293–300, 2024. doi: 10.1049/enc2.121.

[4] P. Urrego, N. Pasqualotto, and J. Delegido, Introducción a la teledetección y aplicaciones medioambientales del programa europeo Copernicus. Calidad de aguas continentales, Univ. de Oporto, 2018. [Online]. Available: https://www.copernicus-user-uptake.eu/fileadmin/FPCUP/dateien/resources/2018-2-23/Tutorial_Copernicus_2020_Oporto_03.pdf

[5] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), NOM-172-SEMARNAT-2023, Diario Oficial de la Federación, Jan. 25, 2024. [Online]. Available: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5715154&fecha=25/01/2024#gsc.tab=0.

[6] D. Toscano, "The Impact of Shipping on Air Quality in the Port Cities of the Mediterranean Area: A Review," Atmosphere, vol. 14, no. 7, p. 1180, 2023. doi: 10.3390/atmos14071180.

[7] G. Fuentes García, R. Sosa Echeverría, J. M. Baldasano Recio, J. D. W. Kahl, E. Granados Hernández, A. L. Alarcón Jímenez, and R. E. Antonio Durán, "Atmospheric Emissions in Ports Due to Maritime Traffic in Mexico," J. Mar. Sci. Eng., vol. 9, no. 11, p. 1186, 2021. doi: 10.3390/jmse9111186.

[8] A. Souza, J. de Oliveira-Júnior, K. Cardoso, and S. Gautam, "Impact of vehicular emissions on ozone levels: A comprehensive study of nitric oxide and ozone interactions in urban areas," Geosyst. Geoenviron., vol. 4, p. 100348, 2024. doi: 10.1016/j.geogeo.2024.100348.

[9] T. A. E. Damaty and E. A. Ghanem, "GIS, GPS, and RS measurements for air quality determination in the port of Damietta Egypt," 2020. [Online]. Available: https://www.azharcermjournal.com/CERMF2010/P20-10-23.pdf.

[10] F. Tack et al., "Assessment of the TROPOMI tropospheric NO2 product based on airborne APEX observations," Atmos. Meas. Tech., vol. 14, pp. 615–646, 2021. doi: 10.5194/amt-14-615-2021.

[11] C. Corradino, P. Jouve, A. La Spina, and C. Del Negro, "Monitoring Earth's atmosphere with Sentinel-5 TROPOMI and Artificial Intelligence: Quantifying volcanic SO2 emissions," Remote Sens. Environ., vol. 315, p. 114463, 2024. doi: 10.1016/j.rse.2024.114463. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425724004899.

[12] Instituto de Aeronomía de Bélgica (BIRA-IASB), Agencia Espacial Europea (ESA), et al., Documento de validación y caracterización de Sentinel-5P TROPOMI, 2024. [Online]. Available: https://mpc-vdaf.tropomi.eu/ProjectDir/reports//pdf/S5P-MPC-IASB-ROCVR-24.00.00_FINAL_signed.pdf.

[13] A. Keppens et al., "5 years of Sentinel-5P TROPOMI operational ozone profiling and geophysical validation using ozonesonde and lidar ground-based networks," Atmos. Meas. Tech., vol. 17, pp. 3969–3993, 2024. doi: 10.5194/amt-17-3969-2024.

[14] W. M. C. J. B. Kulasinghe and A. K. R. N. Ranasinghe, "Study the effect of human activities on air quality of Sri Lanka using satellite images Sentinel 5P," 2024. [Online]. Available: https://acrs-aars.org/proceeding/ACRS2024/AB0115.pdf.

[15] H. Trinh, V. Le, T. Tong, and S. Mai, "Mapping the spatial distribution of air pollutants in Quang Ninh province (Vietnam) using Sentinel 5P data," Geodetski Vestnik, vol. 68, pp. 313–326, 2024. doi: 10.15292/geodetski-vestnik.2024.03.313-326.

[16] D. K. Misra and A. Siddiqui, "Remote sensing and GIS application: An overview," 2016. [Online]. Available: http://vtucs.com/wp-content/uploads/2016/05/Remote_Sensing_and_GIS_Application_IJCSIT.pdf.

[17] A. Lorente, K. F. Boersma, H. J. Eskes, J. P. Veefkind, J. Van Geffen, M. B. De Zeeuw, H. A. C. D. Van Der Gon, S. Beirle, and M. C. Krol, "Quantification of nitrogen oxides emissions from build-up of pollution over Paris with TROPOMI," Sci. Rep., vol. 9, pp. 1–10, 2019.

[18] A. Reshi, S. Pichuka, and A. Tripathi, "Applications of Sentinel-5P TROPOMI Satellite Sensor: A Review," IEEE Sens. J., pp. 1–1, 2024. doi: 10.1109/JSEN.2024.3355714.

[19] Copernicus: Sentinel-5P - eoPortal, Oct. 2, 2024. [Online]. Available: https://www.eoportal.

org/satellite-missions/copernicus-sentinel-5p#-ground-segment. [Accessed: Apr. 13, 2025].

[20] Secretaría de Salud, NOM-023-SSA1-2021, Salud ambiental, Diario Oficial de la Federación, oct. 27, 2021. [Online]. Available: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633854&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0.

[21] Webqc, "Calculadora de masa molar, peso molecular y composición elemental," WebQC, Chemical Portal, 2025. [Online]. Available: https://es.webqc.org/molecular-weight-of-NO2%28g%29.html.

[22] K. M. Tenny and J. S. Cooper, "Ideal Gas Behavior," StatPearls, 2024. [Online]. Available: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK441936/.

Ciencias de la Computación

Ingeniantes

Herramientas digitales para la teledetección de inundaciones en el estado de Colima utilizando imágenes satelitales

RESUMEN: Las inundaciones son uno de los desastres naturales más comunes en el estado de Colima, causando significativas pérdidas económicas y afectando gravemente a la población local. La frecuencia y el impacto de las inundaciones subrayan la necesidad de implementar estrategias efectivas de gestión de riesgos y medidas de mitigación para minimizar sus efectos adversos en la comunidad.

Este artículo examina el uso de herramientas digitales para la teledetección de inundaciones, integrando datos de los satélites Sentinel-1 (SAR) y CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations) en el contexto del huracán Patricia de 2015. Se utilizó Google Earth Engine para procesar las imágenes satelitales, aplicar algoritmos de inteligencia artificial y validar los resultados mediante observaciones in situ.

Los resultados revelan una correlación significativa entre las áreas inundadas detectadas por el satélite Sentinel-1 y los patrones de precipitación extrema registrados por CHIRPS. La integración de datos satelitales y de precipitación proporciona una visión más completa y precisa de las dinámicas de inundación, lo que es crucial para desarrollar estrategias de mitigación y respuesta ante desastres naturales. Este enfoque permite a los responsables de la gestión de riesgos tomar decisiones informadas y proactivas para proteger a las comunidades vulnerables.

PALABRAS CLAVE: CHIRPS, Google Earth Engine, huracán, inundaciones, teledetección, Sentinel-1.

Colaboración
Raúl U. Renteria Flores, Raúl T. Aquino Santos, Jesús López de la Cruz, Universidad de Colima; Joan Saladich Cubero , Geoskop Climate Intelligence

Fecha de recepción: 29 de septiembre 2025
Fecha de aceptación: 12 de noviembre de 2025

ABSTRACT: Floods are one of Colima's most common natural disasters, causing significant economic losses and severely impacting the local population.The frequency and impact of flooding underscore the need to implement effective risk management strategies and mitigation measures to minimize their adverse effects on the community. This article examines digital tools for flood remote sensing, integrating data from the Sentinel-1 (SAR) and Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS) satellites in the context of Hurricane Patricia in 2015. Google Earth Engine processed the satellite images, applied artificial intelligence algorithms, and validated the results through in-situ observations.

The results reveal a significant correlation between flooded areas detected by the Sentinel-1 satellite and extreme precipitation patterns recorded by CHIRPS. Integrating satellite and precipitation data provides a more complete and accurate view of flood dynamics, crucial for developing mitigation and response strategies for natural disasters. This approach enables risk managers to make informed and proactive decisions to protect vulnerable communities.

KEYWORDS: Floods, remote sensing, Sentinel-1, CHIRPS, Hurricane Patricia, Google Earth Engine.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones representan una de las amenazas naturales más recurrentes y costosas a nivel mundial, afectando múltiples dimensiones del bienestar humano como la salud, la seguridad alimentaria, la economía y la infraestructura [1] [2]. Estos eventos naturales no solo resultan en la pérdida de vidas humanas, sino que también provocan daños extensos a la infraestructura, generan consecuencias económicas devastadoras y tienen efectos a largo plazo que frecuentemente derivan en repercusiones sociales adversas [3]. La magnitud de estos impactos subraya la necesidad urgente de desarrollar estrategias efectivas de gestión de riesgos y medidas de mitigación para minimizar sus efectos negativos en las comunidades afectadas.

Las inundaciones repentinas son particularmente peligrosas debido a su naturaleza impredecible y la rapidez con la que pueden desarrollarse. Estas inundaciones suelen ocurrir sin previo aviso y pueden ser provocadas por tormentas eléctricas estacionarias, tormentas que afectan repetidamente la misma área, o precipitaciones intensas asociadas con huracanes y tormentas tropicales [4]. La falta de tiempo para prepararse ante estos eventos aumenta el riesgo para las comunidades afectadas, subrayando la necesidad de sistemas de alerta temprana y estrategias de respuesta rápida para mitigar sus impactos.

Numerosas investigaciones han examinado los efectos y la evaluación de los daños causados por fenómenos hidrometeorológicos extremos, así como por eventos de origen humano y natural [6-9]. Un informe de 2022 destacó que los ciclones tropicales fueron responsables del 51% de las afectaciones por desastres naturales en México, seguidos por las lluvias e inundaciones, que representaron el 26%, y los sismos, con un 11% [10]. Estos datos subrayan la importancia de desarrollar estrategias de mitigación y respuesta ante desastres, especialmente en regiones vulnerables a estos fenómenos.

Estos eventos han aumentado significativamente la vulnerabilidad de las poblaciones afectadas, especialmente en regiones como Colima. En 2015, el huracán Patricia provocó precipitaciones extremas que superaron los 400 mm en un período de 72 horas, resultando en inundaciones catastróficas [8]. La magnitud de estas lluvias y sus consecuencias subrayan la necesidad urgente de implementar medidas de mitigación y estrategias de gestión de riesgos para proteger a las comunidades vulnerables y minimizar los impactos de futuros eventos similares.

En este contexto, la teledetección mediante imágenes satelitales se ha consolidado como una estrategia esencial para la vigilancia y predicción de eventos hidrometeorológicos extremos.

La integración de plataformas digitales como Google Earth Engine, junto con los datos de los satélites Sentinel-1 (SAR) y productos de precipitación como CHIRPS, ha optimizado la capacidad de respuesta ante emergencias y fortalecido las estrategias de mitigación de riesgos [11–14].

Este enfoque permite a los responsables de la gestión del riesgo anticipar y reaccionar de manera más efectiva, minimizando los impactos negativos en comunidades vulnerables y mejorando la planificación de medidas preventivas.

En los últimos años, los avances en inteligencia artificial (IA) y aprendizaje profundo (deep learning) han ampliado significativamente las posibilidades de análisis dentro de la teledetección.

El uso de modelos como las redes neuronales convolucionales (CNN) y arquitecturas derivadas como U-Net permite identificar y segmentar automáticamente las áreas afectadas por inundaciones, extrayendo patrones espaciales complejos de datos radar (Sentinel-1) y de precipitación (CHIRPS) [29] [30].

Estos enfoques superan las limitaciones de los métodos tradicionales de umbralización o clasificación supervisada, ofreciendo resultados más precisos y confiables incluso bajo condiciones de nubosidad o baja visibilidad.

De esta forma, la combinación de teledetección satelital e inteligencia artificial mejora la detección oportuna de áreas inundadas, reduce los tiempos de procesamiento y refuerza la capacidad predictiva de plataformas en la nube como Google Earth Engine [18].

En este estudio se aborda el análisis de las inundaciones generadas por el huracán Patricia en Colima, integrando tres componentes principales:

1. Detección de áreas inundadas mediante imágenes SAR de Sentinel-1.
2. Validación con datos de precipitación del producto CHIRPS.
3. Evaluación de la efectividad de estas herramientas para la gestión de riesgos hídricos.

La metodología propuesta no solo contribuye a comprender eventos pasados, sino que también establece un marco de referencia para el desarrollo de sistemas de alerta temprana más robustos en zonas tropicales propensas a inundaciones repentinas [5,17].

MATERIAL Y MÉTODOS

Herramientas digitales para la detección de inundaciones mediante imágenes satelitales. El uso de herramientas digitales para la teledetección de inundaciones ha experimentado una evolución notable en los últimos años, mejorando significativamente la capacidad para analizar grandes volúmenes de datos satelitales. Estas tecnologías avanzadas permiten la generación de mapas precisos que identifican las áreas afectadas por inundaciones, facilitando una respuesta más efectiva ante desastres naturales. A continuación, se destacan algunas de las herramientas más relevantes que han sido fundamentales para este propósito, proporcionando a los responsables de la gestión de riesgos la información necesaria para tomar decisiones informadas y proactivas.

Satélites Sentinel-1

Los satélites Sentinel proporcionan imágenes de alta resolución que son fundamentales para el monitoreo de inundaciones.

Sentinel-1: Radar de apertura sintética (SAR), puede observar la superficie terrestre bajo cualquier condición climática (día/noche, nubes).[11].

Este estudio se centró exclusivamente en imágenes SAR proporcionadas por Sentinel-1, dada su capacidad para detectar cuerpos de agua bajo condiciones climáticas adversas como nubosidad o lluvia intensa.

Inteligencia artificial y aprendizaje automático
La implementación de técnicas de inteligencia artificial ha revolucionado la detección de inundaciones. Modelos de aprendizaje profundo como las Redes U-Net han demostrado ser altamente eficaces en la segmentación automática de zonas afectadas por inundaciones [12].

Además, aunque los algoritmos de inteligencia artificial pueden procesar imágenes rápidamente, la detección de cuerpos de agua no ocurre en tiempo real. Los satélites como Sentinel-1 tienen revisita cada 6 a 12 días, y sus datos requieren procesamiento posterior. [11]. La integración de datos satelitales con información proveniente de estaciones hidrometeorológicas locales contribuye a desarrollar modelos predictivos más robustos [17].

CHIRPS: Datos Híbridos de Precipitación
CHIRPS es un producto de precipitación cuasi-global desarrollado por el Climate Hazards Center de la Universidad de California Santa Barbara en colaboración con la NASA. Combina múltiples fuentes de datos para proporcionar estimaciones de precipitación confiables, especialmente en regiones con escasas estaciones meteorológicas [18].

Características técnicas:
• Resolución espacial: 0.05° (~5.5 km) desde 1981 hasta presente
• Cobertura temporal: Datos diarios, pentadales y mensuales
• Fuentes de datos:
- Imágenes satelitales infrarrojas (GOES, Meteosat)
- Mediciones in situ de estaciones meteorológicas globales (GHCN, GSOD)
- Reanálisis climáticos (NOAA-CPC)

Desafíos y Oportunidades
El desarrollo e implementación de herramientas digitales para la detección de inundaciones presentan diversos desafíos y oportunidades. Es fundamental evaluar estos factores para garantizar la efectividad de las soluciones tecnológicas en la gestión de riesgos hídricos.

Desafíos
Limitaciones de resolución temporal y espacial
Aunque Sentinel-1 (SAR) opera bajo cualquier condición atmosférica, su frecuencia de revisita (6 a 12 días) puede no ser suficiente para monitoreo en tiempo cuasi-real [18].

Acceso y calidad de datos
En regiones con escasa cobertura de estaciones meteorológicas, como zonas rurales de Colima, validar datos satelitales puede ser complicado [21]. Además, aunque hay productos abiertos como Sentinel o CHIRPS, otros de alta resolución como PlanetScope son comerciales, lo cual limita su acceso en investigaciones públicas.
Validación limitada de resultados

Validación limitada de resultados
La ausencia de datasets validados por instituciones gubernamentales, como mapas de zonas de riesgo actualizados, limita la capacidad de evaluar el rendimiento de los modelos de detección [1]. Esto impacta especialmente en áreas sin infraestructura de monitoreo hidrológico permanente.

Limitaciones de los modelos de aprendizaje automático
Modelos como Random Forest (RF) presentan dificultades para manejar datos secuenciales y condiciones climáticas variables [23]. Asimismo, redes neuronales como LSTM son susceptibles al sobreajuste (overfitting) si no se emplean técnicas como regularización, validación cruzada o dropout [18]. Aunque el sobreajuste es un riesgo común en IA, puede mitigarse mediante diseño cuidadoso del modelo.

Requisitos de infraestructura y personal capacitado
Procesar imágenes SAR con SNAP o plataformas similares requiere hardware especializado y conocimientos técnicos en programación geoespacial [17]. Esto representa un obstáculo para muchas instituciones públicas locales que carecen de recursos o personal formado en estos aspectos.

Oportunidades
Modelos híbridos y de transferencia
El desarrollo de enfoques como RF + LSTM permite combinar interpretabilidad y capacidad predictiva secuencial, optimizando el análisis de inundaciones [23-25]. Además, el transfer learning ha demostrado ser útil para adaptar modelos a regiones con baja disponibilidad de datos históricos [18].

Procesamiento en la nube y democratización tecnológica
Plataformas como Google Earth Engine [26] eliminan la necesidad de computadoras locales de alto rendimiento, permitiendo a investigadores y gobiernos acceder a datos satelitales y herramientas analíticas desde cualquier navegador web.

METODOLOGÍA
Diseño metodológico general
La metodología se centra en el análisis satelital multifuente mediante la técnica de detección activa (radar), integrada en una plataforma de procesamiento en la nube.

Se utilizaron datos de los satélites Sentinel-1 (SAR) y CHIRPS (precipitación), procesados mediante Google Earth Engine (GEE). El objetivo fue cuantificar áreas afectadas por inundación y correlacionarlas con eventos de precipitación extrema. Además, se revisaron estudios previos y se contrastaron los resultados con datos secundarios para validar la estrategia metodológica.

Área de estudio y periodo de análisis

El área de estudio corresponde al estado de Colima, una región tropical ubicada en el occidente de México con alta exposición a fenómenos hidrometeorológicos. Se delimitó espacialmente utilizando una colección administrativa (FeatureCollection) filtrada por entidad federativa. El periodo de análisis se concentró entre el 1 y el 31 de octubre de 2015, periodo en que impactó el huracán Patricia.

Procesamiento de datos satelitales

- Sentinel-1 (Radar SAR)

Se utilizaron productos Sentinel-1 GRD (Ground Range Detected) en modo IW (Interferometric Wide Swath), con polarización VV (vertical-vertical), adecuados para el análisis de cuerpos de agua bajo condiciones climáticas adversas. El procesamiento se realizó en GEE, con las siguientes etapas:

- Preprocesamiento: aplicación de filtro speckle para reducción de ruido, calibración radiométrica a decibelios y corrección geométrica usando el modelo digital de elevación SRTM.
- Análisis de cambio: se calcularon imágenes de diferencia entre el periodo pre-evento (1–15 oct) y post-evento (24 oct–7 nov). Se aplicó una umbralización de 1.5 dB para identificar áreas con cambios abruptos, clasificando los píxeles como agua/no agua. El umbral de 1.5 dB se adoptó con base en valores reportados en estudios, donde diferencias superiores a este rango se asocian con cambios súbitos de retrodispersión relacionados con inundación [27][28].
- Cálculo de área: mediante álgebra de píxeles, se estimó la superficie inundada en km^2. El resultado se exportó en formato GeoTIFF para análisis complementario en QGIS.

CHIRPS (precipitación)

Los datos diarios de precipitación se obtuvieron del producto UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY (resolución espacial 0.05°, ~5.5 km). Se filtró el periodo del 20 al 25 de octubre de 2015 y se calcularon acumulados y máximos diarios.

Posteriormente, se generaron mapas de isolíneas y se superpusieron con las capas de inundación derivadas de Sentinel-1 para evaluar coincidencias espaciales y temporales. Este cruce permitió relacionar directamente eventos extremos de precipitación con las zonas afectadas por inundaciones.

Procesamiento computacional y herramientas utilizadas

El procesamiento se realizó casi en su totalidad mediante Google Earth Engine, aprovechando su capacidad de cálculo en la nube y la disponibilidad de datos satelitales de libre acceso [26]. La herramienta SNAP de la ESA se utilizó como referencia para validación de parámetros en imágenes Sentinel-1, aunque no fue implementada directamente en este estudio.

Los resultados se exportaron para su análisis posterior en QGIS (sistema de información geográfica de código abierto) y en Python para generar gráficas de precipitación diaria y acumulada.

Validación cruzada y comparación con estudios previos

Para validar los resultados, se compararon las áreas identificadas como inundadas con reportes del CENAPRED sobre los impactos del huracán Patricia en Colima. Además, se contrastaron los mapas generados con registros históricos de precipitación e imágenes publicadas en literatura académica sobre eventos similares [6][8].

Si bien no se contó con validación in situ, la correlación entre zonas con alta precipitación (≥106 mm) y las áreas clasificadas como inundadas en radar respalda la confiabilidad metodológica.

RESULTADOS

Google Earth Engine con Sentinel-1

En la Figura 1 se muestra el primer flujo para el tratamiento de imágenes Sentinel-1 (SAR) y Sentinel-2 (óptico), destacando que para este estudio solamente usamos Sentinel-1 desde su carga en Google Earth Engine (GEE), hasta la fusión de resultados para crear mapas de inundación en QGIS.

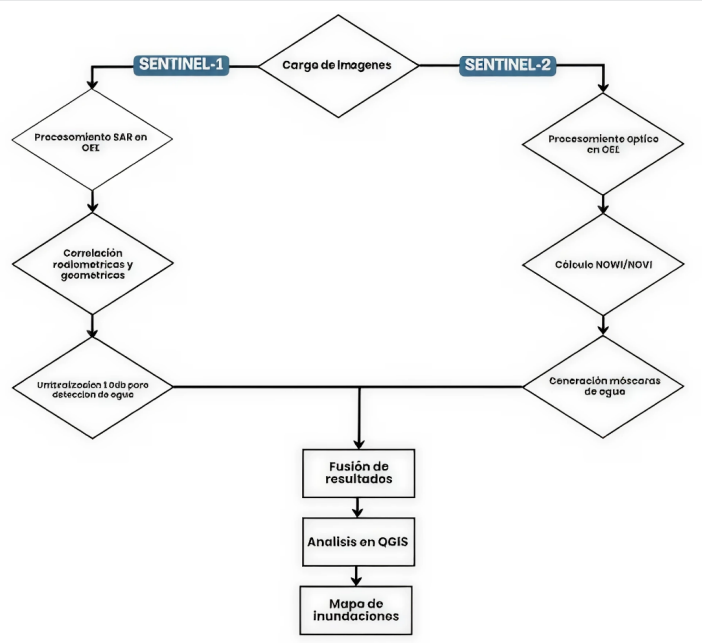


Figura 1. Diagrama de flujo para imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta una explicación paso a paso del código de Google Earth Engine diseñado para calcular las áreas inundadas en Colima, México, a partir de imágenes de satélite de Sentinel-1 tras el paso del huracán Patricia en 2015.

Primero se define la región de interés usando un conjunto de características (Feature Collection) que representa

divisiones administrativas. En este caso, se filtra para seleccionar el estado de Colima, como se puede observar en la Figura 2.

```
// Definir la región de interés (Colima, México)
var colima = ee.FeatureCollection("FAO/GAUL/2015/level2")
                .filter(ee.Filter.eq('ADM2_NAME', 'Colima'))
                .filter(ee.Filter.eq('ADM1_NAME', 'Colima'));
```

Figura 2. Definición del área de interés
Fuente: Elaboración propia.

Después se procede a hacer una carga de colección de imágenes de radar de la misión Sentinel-1. Se filtra por ubicación (dentro de Colima), fechas (del 1 al 15 de octubre de 2015), modo de instrumento (IW) y polarización (VV), como se puede observar en la Figura 3.

```
var prevEventCollection = ee.ImageCollection(
    COPERNIGUS/51,GRD')
    .filterBounds('collma', '2015-10-15')
    .filterDate(colima),
    .filter(ee.filter.eq:(inst('transmitterRecepelsacion,'VV')
    .select('V')
    .median();
var postEventCollection = ee.ImageCollection(
    COPERNIGUS/51,GRD')
    .filterBounds('colima', '2015-11-07')
    .filterDate(colima),
    .filter(ee.Filter.eq:(inst('transmitterRecepolsacion,'VV')
    .select('V')
    .medlan();
```

Figura 3. Carga de imágenes Sentinel-1 antes y después del evento.
Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso es verificar si existen hay bandas disponibles en las colecciones de imágenes antes y después del evento. Si no hay bandas, se asigna una imagen con valor cero, Figura 4.

```
// Verificar si hay imágenes disponibles
var preEvent = preEventCollection.bandNames().size().gt(0) ? preEventCollection : ee.Image(0);
var postEvent = postEventCollection.bandNames().size().gt(0) ? postEventCollection : ee.Image(0);
```

Figura 4. Verificación de bandas disponibles.
Fuente: Elaboración propia.

Después de ello se calcula la diferencia entre las imágenes post y pre-evento. Se usa un umbral (1.5) para identificar áreas que han cambiado significativamente (indicando inundación), como se puede observar en la Figura 5.

```
// Calcular la diferencia solo si ambas imágenes están disponibles
var diff = ee.Image(ee.Algorithms.If(
    preEvent.bandNames().size().gt(0).and(postEvent.bandNames().size().gt(0)),
    postEvent.subtract(preEvent).gt(1.5),  // Ajustar umbral si es necesario
    ee.Image(0)
));
```

Figura 5. Cálculo de la diferencia entre imágenes.
Fuente: Elaboración propia.

Después de realizar el cálculo, ahora se procede a centrar el mapa en la región de Colima y se añaden las áreas inundadas al mapa, utilizando una paleta de color rojo para visualizarlas, como se puede observar en la Figura 6.

```
// Recortar la imagen a la región de Colima
var floodedAreas = diff.clip(colima);

// Visualizar las áreas inundadas
Map.centerObject(colima, 10);
Map.addLayer(diff.updateMask(diff), {palette: 'blue'}, 'Áreas Inundadas');
Map.addLayer(floodedAreas.updateMask(floodedAreas), {palette: 'red'}, 'Áreas Inundadas Colima
```

Figura 6. Recorte de la imagen al estado de colima.
Fuente: Elaboración propia.

Ahora se procede a multiplicar la imagen de diferencia (donde se indica inundación) por el área de cada píxel para obtener el área total inundada. Luego, se suma el área en la región de Colima. Después se obtiene el valor del área inundada en metros cuadrados y se convierte a kilómetros cuadrados. Se maneja la posibilidad de que no haya datos (asignando cero si es necesario), Figura 7.

```
// Calcular el área total inundada en km²
var pixelArea = diff.multiply(ee.Image.pixelArea());
var areaFlooded = pixelArea.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: colima,
  scale: 30,
  maxPixels: 1e9
});

// Manejar el caso donde no hay áreas inundadas
var areaFloodedKm2 = ee.Number(areaFlooded.get('VV')).divide(1e6).getInfo() || 0;
print('Área inundada en km²:', areaFloodedKm2);
```

Figura 7. Cálculo del área total inundad en km².
Fuente: Elaboración propia.

Por último, se exporta la imagen recortada a formato GeoTIFF para poderlo procesar con otro programa gestionador de mapas como Qgis, en la Figura 8 se puede observar el código.

```
// Exportar la imagen recortada como GeoTIFF
Export.image.toDrive({
  image: floodedAreas,
  description: 'Areas_Inundadas_Colima',
  scale: 30,
  region: colima.geometry(),
  fileFormat: 'GeoTIFF',
  maxPixels: 1e9
});
```

Figura 8. Exportar la imagen como GeoTIFF.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 9 muestra el resultado final de las áreas inundadas por el huracán Patricia en 2015. Este código utiliza imágenes de radar de Sentinel-1 para calcular y visualizar las áreas inundadas en Colima tras el huracán Patricia, lo que permite a los investigadores y a los responsables de la toma de decisiones evaluar el impacto de desastres naturales y planificar respuestas adecuadas.

Las áreas marcadas en azul corresponden a los pixeles inundados en los alrededores del estado de Colima y las imágenes de color rojo son del estado de Colima.

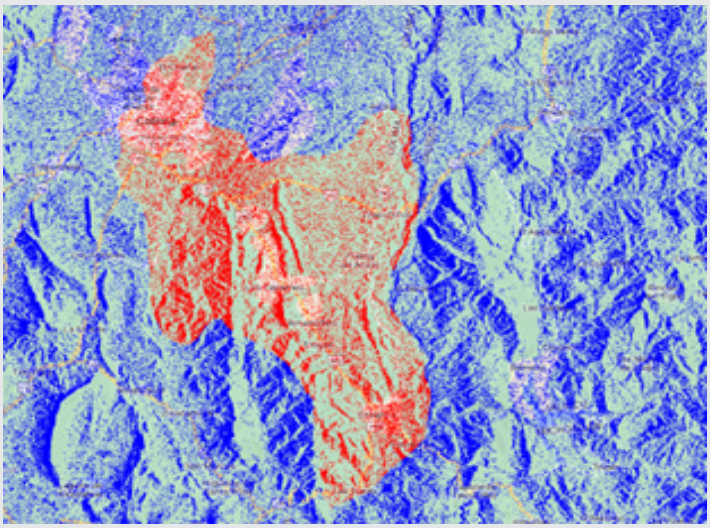


Figura 9. Áreas inundadas en Colima .
Fuente: Elaboración propia.

El análisis con imágenes Sentinel-1 en Google Earth Engine reveló:

1. Áreas inundadas detectadas:

- Se identificaron 142 km² de superficie inundada en Colima tras el huracán Patricia (octubre 2015).

2. Metodología clave:

- Comparación de imágenes SAR pre-evento (1-15 oct) y post-evento (24 oct-7 nov).
- Umbral de detección: 1.5 dB en diferencia de retrodispersión VV.
- Resolución espacial: 30 metros (precisión para mapeo municipal).

3. Productos generados:

- Mapa GeoTIFF de áreas inundadas (descargable para QGIS/ArcGIS).
- Cuantificación exacta del área afectada en km².

4. Validación:

- Los resultados coincidieron con:

- Reportes oficiales de CENAPRED [8]
- Datos de precipitación extrema de CHIRPS (105.97 mm/día)

Datos CHIRPS con Google Earth Engine y Python

A continuación, se presenta una explicación paso a paso del código de Google Earth Engine para descarga de datos de CHIRPS tras el paso del huracán Patricia en 2015, para después analizarlos con Python.

Primero se define la región de interés usando un conjunto de características (Feature Collection) que representa divisiones administrativas. En este caso, se filtra para seleccionar el estado de Colima, como se puede observar en la Figura 10.

• Coordenadas:

- Esquina suroeste: -104.58° Lon, 18.96° Lat
- Esquina noreste: -103.60° Lon, 19.45° Lat

Nota: Este filtro espacial es clave para optimizar el procesamiento.

```
// 1. Definir la región de Colima (bounding box aproximado)
var colima = ee.Geometry.Rectangle([-104.58, 18.96, -103.60, 19.45]);
```

Figura 10. Definición del área de interés.
Fuente: Elaboración propia.

Después se procede a hacer una carga de colección de imágenes de UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY (datos diarios de precipitación), para la carga de datos se filtró por la fecha del mes en el cual llego el Huracán Patricia, como se observa en la Figura 11.

```
// 1. Definir la región de Colima (bounding box aprocimado)
var colima = ee.Geometry.Rectangle([-104.58, 18.96, -103.60,19.45]];

// 2. Cargar y filtrar CHIRPS Daily por fecha y región
var dataset = ee.ImageCollection('UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY')
      .filter(ee.Filter.date('2015-10-01', '2015','2015-10-31'))
      .filterBounds(colima);  // ¡filtro clávé paro para par Colima!

var precipitation = dataset.select('precipitation');

// 3. Parámetros de visualización
var precipitationVis = {
   min: 1,
   max: 17,
   palette: [''0011137', '0aable', 'e7eb05', 'ffa42d', 'e90000'];
 };
```

Figura 11. Carga de los datos CHIRPS.
Fuente: Elaboración propia.

Por último, se procede a realizar un centrado de los datos para el estado de Colima y después a descargar los datos en formato CSV para analizarlos con Python, en la Figura 12, se puede observar el código implementado.

```
// 4. Centrar el mapa en Colima y añadir capa
Map.setCenter(-104.0, 19.2, 7);  // Coordenadas aproximadas de Colima
Map.addLayer(precipitation, precipitationVis, 'Precipitation Colima');
Map.addLayer(colima, {color: 'FF0000'}, 'Área de Colima');  // Opcional: para ver el bounding box

// Convertir ImageCollection a tabla (por día)
var tabla = precipitation.map(function(image) {
  var fecha = image.date().format('YYYY-MM-dd');
  var stats = image.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean(),
    geometry: colima,
    scale: 5000
  });
  return ee.Feature(null, {
    'date': fecha,
    'precip_mm': stats.get('precipitation')
  });
});

// Exportar a CSV
Export.table.toDrive({
  collection: ee.FeatureCollection(tabla),
  description: 'CHIRPS_Colima_Oct2015_CSV',
  fileFormat: 'CSV'
});
```

Figura 12. Descarga de datos CHIRPS.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 13 se ve una visualización de México con la precipitación de CHIRPS, con la fecha del mes de octubre del 2015, el color rojo es cuando existe mayor precipitación.

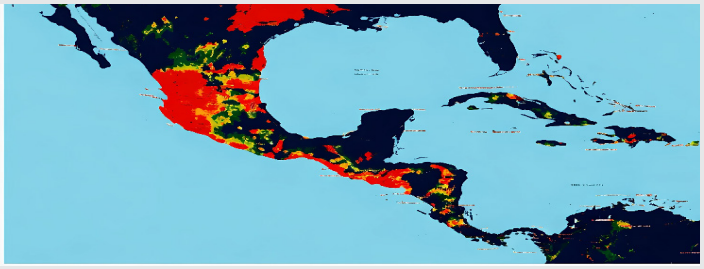


Figura 13. Mapa de precipitación CHIRPS de México.
Fuente: Elaboración propia.

Análisis de los datos descargados con Python

En la Figura 14 se muestra el diagrama de flujo para el análisis de datos CHIRPS: filtrado espaciotemporal, cálculo de acumulados de lluvia y exportación a CSV para generar gráficas temporales en Python.

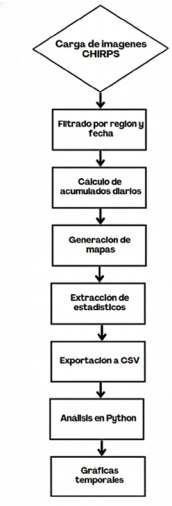


Figura 14. Diagrama de flujo para el procesamiento CHIRPS .
Fuente: Elaboración propia .

Este código Python procesa y visualiza datos de precipitación del producto CHIRPS para analizar el impacto del huracán Patricia en octubre de 2015. A continuación, se explica algunos componentes claves en el código:

Carga y preparación de datos

En la Figura 15, se observa el código implementado para la carga de los datos de CHIRPS previamente descargados con Google Earth Engine.

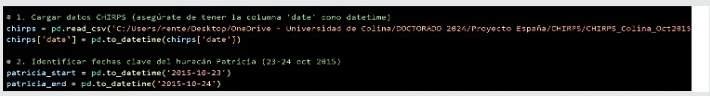


Figura 15. Carga de datos CHIRPS en Python.
Fuente: Elaboración propia.

Filtrado del evento.

Después se procede a realizar un filtrado de los datos para obtener la precipitación de la fecha de llegada del huracán patricia, como se puede observar en la figura16.

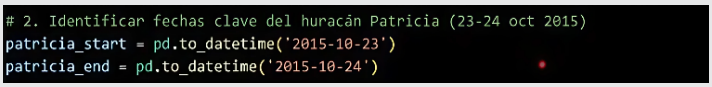


Figura 16. Filtrado por fecha.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, procesamos los datos obtenidos para generar una gráfica de la precipitación registrada en octubre de 2015. Esto nos permitirá comparar si existe alguna tendencia relacionada con la fecha de llegada del huracán Patricia, como se puede observar en la Figura 17.

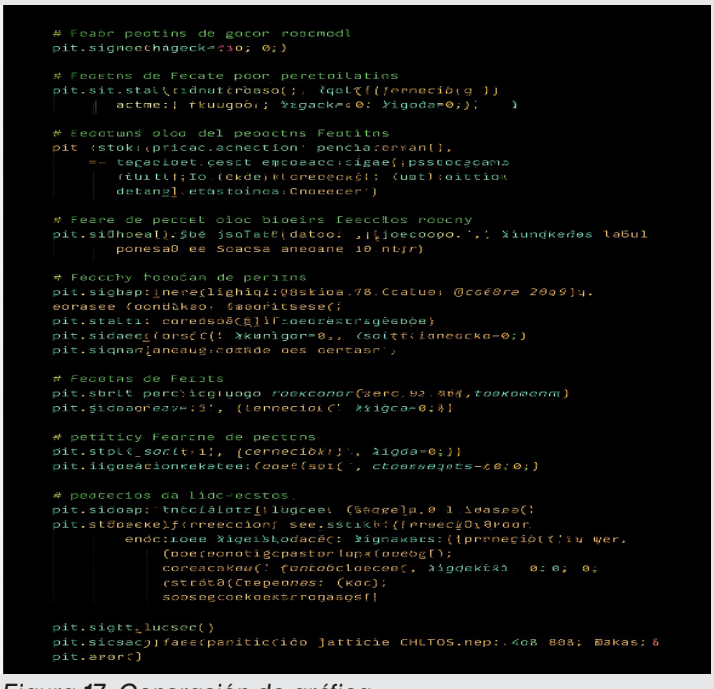


Figura 17. Generación de gráfica.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra la gráfica generada de Python. La Figura 18 muestra la precipitación diaria en Colima durante octubre de 2015, destacando el impacto del huracán Patricia los días 23-24 de octubre.

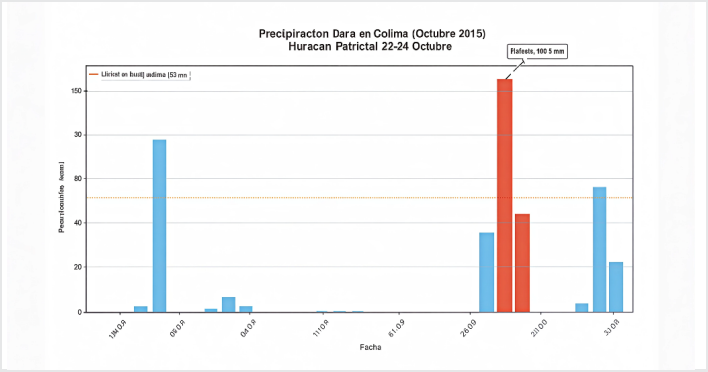


Figura 18. Precipitación generada en el mes de octubre 2015.
Fuente: Elaboración propia.

Las barras azules representan la lluvia normal, mientras que las rojas marcan el evento extremo, donde se registró un pico de 106 mm en un solo día, superando por más del doble el umbral de lluvia extrema (línea naranja en 50 mm). Este incremento abrupto evidencia la intensidad del huracán, contrastando con los valores moderados previos y posteriores al evento.

CONCLUSIONES

El estudio integrado de datos Sentinel-1 (SAR), CHIRPS (precipitación) y herramientas como Google Earth Engine permitió caracterizar con precisión el impacto del huracán Patricia en Colima. Los resultados demostraron:

Detección precisa de inundaciones

Sentinel-1 identificó 142 km2 de áreas inundadas mediante radar SAR, evitando limitaciones por nubosidad.

Correlación causa-efecto

Los datos CHIRPS revelaron un pico de 106 mm en un día (23-oct), explicando el origen hidrometeorológico de las inundaciones. Esta precipitación extrema, 212% superior al umbral de riesgo, coincidió espacial y temporalmente con las áreas afectadas mapeadas por SAR.

Ventajas metodológicas

La integración en Google Earth Engine agilizó el procesamiento de grandes volúmenes de datos, reduciendo tiempos de análisis de días a horas.

Los modelos de aprendizaje automático (ej. umbralización en SAR) mostraron alta eficiencia para la segmentación automática de zonas inundadas.

Implicaciones y Recomendaciones

Gestión de riesgos: Estos resultados sustentan el desarrollo de sistemas de alerta temprana basados en la combinación de SAR y datos de precipitación en tiempo cuasi-real.

Futuras investigaciones:

Se reconoce que este estudio no incluyó métricas de validación cuantitativa (precisión, exactitud, matriz de confu-

sión) por ausencia de datasets clasificados de referencia en la región. Sin embargo, se propone incorporar estas métricas en investigaciones futuras mediante el uso de datos de campo o incorporando sensores IoT para validación in situ y modelos híbridos (SAR + LSTM) para predicciones más robustas.

Modelos como U-Net o Random Forest fueron analizados en la revisión literaria, pero no fueron implementados en este estudio. Se plantean como posibilidad para investigaciones futuras.

En síntesis, este trabajo evidencia cómo la teledetección multidisciplinar —con tecnologías abiertas y gratuitas— puede transformar la respuesta ante desastres naturales, especialmente en regiones tropicales vulnerables como Colima. Los datos obtenidos no solo tienen valor académico, sino también aplicaciones concretas en políticas públicas de protección civil.

BIBLIOGRAFÍA

[1] UNDRR. (2022). Global assessment report on disaster risk reduction 2022. https://www.undrr.org Recuperado el 4 de junio de 2025.

[2] WMO. (2021). Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes. https://library.wmo.int/ Recuperado el 4 de junio de 2025.

[3] Cajigal Molina, E., & Maldonado González, A. L. (2019). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante inundaciones. Un ejercicio emergente ante el cambio climático. Economía, sociedad y territorio, 19(61), 543–574.

[4] Rivera, J. A., Marianetti, G., & Scaglione, M. (2022). Análisis de los eventos de precipitación que afectan la distribución de agua potable en el Gran Mendoza, Argentina. Cuadernos Geográficos, 61(2), 204–222.

[5] Zavalegui, R. A. S., Alvarado, R. C., Rojas, M. Á. B., Ruíz, M. M. C., & Sanabria, J. M. C. (2023). Vulnerabilidad social ante inundaciones pluviales en tres comunidades rurales mayas de Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México. Sociedad y Ambiente, (26), 1–32.

[6] Aguilar, J. P. M., & López, A. G. (2020). Daños económicos y sociales por huracanes e inundaciones en México: periodo de 2010 a 2015. Aqua-LAC, 12(2), 67–77.

[7] Velasco, I. A. (2023). Reseña de José Manuel Camacho Sanabria y Rosalía Chávez Alvarado, Riesgos hidrometeorológicos en el sureste mexicano (Quintana Roo): inundaciones urbanas. México: Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, 2022. Perspectiva Geográfica, 28(2).

[8] González, O. M. (2021). El ciclón que nadie vio: Riesgos que potenciaron un desastre en el Noroeste de México. Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER, 5(1), 110–125.

[9] Ortiz, J. L. (2020). Vulnerabilidad en la ciudad costera: Modelo de prevención del riesgo hidrometeorológico. Academia XXII, 11(21), 3–20.

[10] CENAPRED. (2022). Resumen ejecutivo del impacto de desastres en México. https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/494-RESUMENEJECUTIVOIMPACTO2022.pdf Recuperado el 4 de junio de 2025.

[11] European Space Agency (ESA). (2022). Sentinel-1: Radar observations.

[12] Pech-May, F., Aquino-Santos, R., & Delgadillo-Partida, J. (2023). Sentinel-1 SAR images and deep learning for water body mapping. Remote Sensing, 15(12), 3009. https://doi.org/10.3390/rs15123009.

[13] Tanim, A. H., McRae, C. B., Tavakol-Davani, H., & Goharian, E. (2022). Flood detection in urban areas using satellite imagery and machine learning. Water, 14(7), 1140. https://doi.org/10.3390/w14071140.

[14] Higuchi, A. (2021). Toward more integrated utilizations of geostationary satellite data for disaster management and risk mitigation. Remote Sensing, 13(8), 1553. https://doi.org/10.3390/rs13081553.

[15] Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations (CHIRPS) dataset for drought monitoring. Scientific Data, 2(1), 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66.

[16] Giovannettone, J., Copenhaver, T., Burns, M., & Choquette, S. (2018). A statistical approach to mapping flood susceptibility in the Lower Connecticut River Valley region. Water Resources Research, 54(10), 7603–7618. https://doi.org/10.1029/2018WR023018.

[17] Kabir, S., Patidar, S., Xia, X., Liang, Q., Neal, J., & Pender, G. (2020b). A deep convolutional neural network model for rapid prediction of fluvial flood inundation. Journal of Hydrology, 590, 125481. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125481.

[18] Bentivoglio, R., Isufi, E., Jonkman, S. N., & Taormina, R. (2022). Deep learning methods for flood mapping: A review of existing applications and future research directions. Hydrology and Earth

System Sciences, 26(16), 4345–4378. https://doi.org/10.5194/hess-26-4345-2022.

[19] Tamiru Haile, A., Worku Bekele, T., & Rientjes, T. (2023). Interannual comparison of historical floods through flood detection using multi-temporal Sentinel-1 SAR images, Awash River Basin, Ethiopia. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 124, 103505. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103505.

[20] Wedajo, G. K., Lemma, T. D., Fufa, T., & Gamba, P. (2024). Integrating satellite images and machine learning for flood prediction and susceptibility mapping for the case of Amibara, Awash Basin, Ethiopia. Remote Sensing, 16(12). https://doi.org/10.3390/rs16122163.

[21] Roy, S., Bose, A., & Chowdhury, I. R. (2021a). Flood risk assessment using geospatial data and multi-criteria decision approach: a study from historically active flood-prone region of Himalayan foothill, India. Arabian Journal of Geosciences, 14(11), 999. https://doi.org/10.1007/s12517-021-07324-8.

[22] Nevo, S., Morin, E., Gerzi Rosenthal, A., Metzger, A., Barshai, C., Weitzner, D., Voloshin, D., Kratzert, F., Elidan, G., Dror, G., Begelman, G., Nearing, G., Shalev, G., Noga, H., Shavitt, I., Yuklea, L., Royz, M., Giladi, N., Peled Levi, N., ... Matias, Y. (2022). Flood forecasting with machine learning models in an operational framework. Hydrology and Earth System Sciences, 26(15), 4013–4032. https://doi.org/10.5194/hess-26-4013-2022.

[23] Karim, F., Armin, M. A., Ahmedt-Aristizabal, D., Tychsen-Smith, L., & Petersson, L. (2023). A review of hydrodynamic and machine learning approaches for flood inundation modeling. Water (Switzerland), 15(3). https://doi.org/10.3390/w15030566.

[24] Drakonakis, G. I., Tsagkatakis, G., Fotiadou, K., & Tsakalides, P. (2022). OmbriaNet-supervised flood mapping via convolutional neural networks using multitemporal Sentinel-1 and Sentinel-2 data fusion. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 15, 2341–2356. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3155559.

[25] Tang, Y., Yan, M., Wang, X., Lu, C., & Luo, J. (2021). Experimental and modeling investigation of pumping from a fresh groundwater lens in an idealized strip island. Journal of Hydrology, 602, 126734. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126734.

[26] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031.

[27] Twele, A., Cao, W., Plank, S., & Martinis, S. (2016). Sentinel-1-based flood mapping: A fully automated processing chain. International Journal of Remote Sensing, 37(13), 2990–3004. https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1192304.

[28] Tarpanelli, A., Mondini, A. C., & Camici, S. (2022). Effectiveness of Sentinel-1 and Sentinel-2 for flood detection assessment in Europe. Natural Hazards and Earth System Sciences, 22, 2473–2489. https://doi.org/10.5194/nhess-22-2473-2022.

[29] Nouioua, T., Tarek, N. (2023). Flood Detection in Satellite Images using Deep Learning. In Proceedings of the IEEE (via ResearchGate).

[30] Ghosh, B., Garg, S., Motagh, M., Martinis, S. (2024). Automatic Flood Detection from Sentinel-1 Data Using a Nested U-Net Model and a NASA Benchmark Dataset. Earth Science Informatics, 17(4).

Ciencias de la Computación

Ingeniantes

Intelligent Agents Applied to E-Commerce: A Comparative Study of AutoGen and Semantic Kernel

RESUMEN: La inteligencia artificial (IA) ha transformado significativamente el comercio electrónico, permitiendo la automatización de procesos y la optimización de la toma de decisiones. Dentro de este contexto, los Modelos de Lenguaje de Gran Escala (LLM) han facilitado la interacción con los usuarios mediante Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN), mejorando la comunicación en plataformas digitales.

Este artículo explora el uso de agentes inteligentes en la negociación electrónica, destacando su capacidad para automatizar interacciones y mejorar la eficiencia en la toma de decisiones comerciales. Se analizan dos herramientas desarrolladas por Microsoft: Semantic Kernel y AutoGen, ambas diseñadas para facilitar la creación y gestión de agentes inteligentes en entornos de comercio digital.

La investigación compara el desempeño de ambas herramientas en aspectos como personalización, facilidad de implementación y optimización. AutoGen se destaca en la gestión de sistemas multi- agentes y toma de decisiones automatizada, mientras que Semantic Kernel sobresale en procesamiento del lenguaje natural y personalización de interacciones.

PALABRAS CLAVE: AutoGen, Semantic kernel, Agentes inteligentes, E-commerce, prompt Tuning, Procesamiento del Lenguaje Natural.

Colaboración
Alba Beth-birai López Aguilar; Jesús Eduardo Ceballos Contreras; Walter Alexander Mata López; Jesús Alberto Verduzco Ramírez; Víctor Hugo Topete Castillo, Universidad de Colima

Fecha de recepción: 25 de agosto 2025
Fecha de aceptación: 13 de septiembre de 2025

ABSTRACT: Artificial Intelligence (AI) has significantly transformed e-commerce by enabling process automation and optimizing decision-making. Within this context, Large Language Models (LLMs) have facilitated user interaction through Natural Language Processing (NLP), improving communication on digital platforms.

This article explores the use of intelligent agents in electronic negotiation, highlighting their ability to automate interactions and improve the efficiency of business decision-making. It analyzes two tools developed by Microsoft: Semantic Kernel and AutoGen, both designed to support the creation and management of intelligent agents in digital commerce environments.
The research compares the performance of both tools in aspects such as

personalization, ease of implementation, and optimization. AutoGen excels in managing multi-agent systems and automated decision-making, while Semantic Kernel stands out in natural language processing and personalization of interactions.

KEYWORDS: AutoGen, Semantic kernel, Intelligent Agents, E-commerce, prompt Tuning, Natural Language Processing.

INTRODUCCIÓN

La Inteligencia artificial (IA) es considerada como una llave hacia un nuevo mundo tecnológico y avanza a grandes pasos generando impacto significativo en diversas áreas. Uno de los muchos sectores donde la IA ha tenido mayor influencia es el comercio electrónico, optimizando la automatización de pro-

cesos, la toma de decisiones y la personalización de preferencias.

En este contexto, la aparición de la IA generativa crea una nueva visión de la manera en la que se crea contenido, al combinarse con los Modelos de Lenguaje de Gran Escala (LLM, por sus siglas en inglés). Estos modelos permiten la creación automatizada de contenido textual, gráfico, sonoro y audiovisual con alta calidad [7] (Franganillo, 2023). Un ejemplo de IA Generativas incluye CHATGPT, Gemini, Copilot y Deepseek, estas IA han transformado la forma en la que los usuarios se comunican y buscan información de manera rápida y sencilla.

Este avance no sería posible sin el Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN) que facilita la interacción entre los modelos de lenguaje y los usuarios a través de los prompts, gracias a esta tecnología, las IA Generativas pueden comprender, procesar y responder solicitudes de múltiples usuarios, mejorando eficiencia y accesibilidad de búsqueda de información.

Por su parte, el desarrollo de agentes inteligentes no se limita únicamente a los a modelos generativos. Existen diversas tecnologías como API (Un API funciona como un puente que permite que diferentes programas o servicios se comuniquen entre sí, facilitando el acceso a funcionalidades externas sin necesidad de desarrollar todo desde cero), kernel y librerías que permiten crear agentes de inteligencia artificial sin sobrecargar nuestro ordenador computacional. Entre las herramientas más destacadas en este campo se encuentran Semantic kernel de Microsoft y AutoGen, ambas desarrollada por Microsoft. Semantic Kernel facilita la integración de modelos de lenguaje con flujos de trabajo personalizados mediante la orquestación de prompts y la combinación de distintas habilidades de IA. Por su parte, AUTOGEN permite la creación de agentes autónomos capaces de colaborar con modelos de lenguaje más estructurada y eficiente (Microsoft, 2023).

En proyectos anteriores, se ha desarrollado un modelo de agentes inteligentes enfocados al comercio electrónico enfocada en la compra y renta de inmuebles dentro de la organización de eventos [11] (López Aguilar, 2024). Para la realización de dicho modelo se utilizó la API de Microsoft AUTOGEN (Microsoft, 2023), una API diseñada para crear sistemas de múltiples agentes permitiendo la generación automática de contenido y administración. Sin embargo, aunque esta herramienta ha generado logros excepcionales para el propósito ideal, nace la interesante interrogativa dónde probemos distintos métodos para poder optimizar los procesos en las negociaciones y las tomas de decisiones dentro de estas mismas.

Antecedentes de los agentes inteligentes en el e-commerce

En años recientes, los agentes inteligentes han evolucionado magnánimamente gracias a los modelos de lenguaje a gran escala (LLM), una de las contribuciones más relevantes en esta línea de investigaciones es el trabajo de [4] Cheng et al. (2024) quienes ofrecen una visión integral sobre los agentes basados en modelos, este estudio destaca agentes que no solo operan de forma autónoma, sino que también permiten la construcción de sistemas multi-agentes con capacidades avanzadas de planificación, razonamiento cognitivo y el uso de herramientas externas. Los autores señalan que este tipo de arquitectura es fundamental para aplicaciones con entornos dinámicos, que es el caso del comercio electrónico, donde existe la personalización, el análisis contextual y toma de decisiones esenciales. El enfoque descrito en el manuscrito refuerza la importancia de utilizar herramientas tecnológicas como AutoGen y Semantic Kernel, las cuales aprovechan la capacidad de los LLM para interactuar y adaptarse al comportamiento del usuario.

Según [5] Elizondo, E. & Salazar (2019) los agentes inteligentes son sistemas autónomos que perciben su entorno mediante sensores, que procesan la información utilizando técnicas de inteligencia artificial actuando en un entorno diseñado para alcanzar objetivos predefinidos. Estos agentes permiten cumplir objetivos con interacciones automáticas sin intervención humana.

Existen diversas clasificaciones de agentes inteligentes según su funcionalidad y uso dentro de la industria de la tecnología, de las cuales se encuentran:

- Agentes colaborativos
- Agentes de Interfaz
- Agentes de la información
- Agentes Reactivos
- Agentes Sociales
- Agentes Móviles
- Agentes Híbridos

Para la implementación de este proyecto, se utilizan principalmente los agentes colaborativos y de la información, lo cual se alinea con el enfoque en el comercio digital.

Por ejemplo, [12]Matta Catora (2012) desarrolló un sistema web para gestionar ventas y facturación electrónica, en la cual los agentes inteligentes optimizan el manejo de información, la aplicación demostró el valor de los agentes en procesos empresariales que requieren manejo de datos precisos y toman decisiones de manera autónoma. De una manera muy similar a nuestro modelo, el agente vendedor gestiona transacciones e interacción con el cliente.

Procesamiento de lenguaje natural en agentes inteligentes

El PLN es una rama de la inteligencia artificial que permite a las máquinas comprender, procesar y generar lenguaje humano. Los modelos de lenguaje como los

utilizados en Semantic Kernel emplean técnicas avanzadas de PLN para interpretar las intenciones del usuario y generar respuestas coherentes [10] (Jurafsky & Martin, 2022). Aplicación de PLN en comercio electrónico:

- Chatbots inteligentes que mejoran la atención al cliente.
- Análisis de sentimiento para evaluar la satisfacción del usuario.
- Automatización de respuestas en negociaciones electrónicas.

En este artículo se abordará el tema con más detalle mediante la comparativa de AutoGen y Semantic Kernel, evaluando las funcionalidades, ventajas y limitaciones en el desarrollo de agentes inteligentes dentro de nuestro campo objetivo; el comercio electrónico.

Negociación electrónica y agentes inteligentes

La negociación electrónica es el proceso automatizado en el que agentes inteligentes representan a compradores y vendedores para alcanzar acuerdos óptimos en transacciones digitales [1] (Baarslag et al., 2016). Dichos agentes utilizan algoritmos de toma de decisiones combinado con técnicas de PLN para poder analizar propuestas, generar respuestas y mejorar la eficiencia en la negociación.

Según el contexto dado, los agentes pueden:

- Automatizar la comunicación entre clientes y proveedores.
- Personalizar ofertas y recomendaciones en tiempo real.
- Ajustar estrategias de precios dinámicamente según la demanda del comercio.

Un ejemplo de uso de este tipo de agentes es la plataforma comercial de Amazon, la cual usa IA para ajustar dinámicamente los precios según la competencia.

Negociación electrónica con autogen y semantic kernel

La implementación de agentes inteligentes en la negociación electrónica es clave para optimizar la automatización en interacciones y la toma de decisiones, es así como Microsoft AutoGen y Semantic kernel pueden desempeñar roles específicos que potencian estos sistemas.

AutoGen en la negociación

- Creación de agentes multi-agentes que simulan el proceso de negociación.
- Automatización de respuestas y ajustes en ofertas en tiempo real
- Integración con modelos de lenguaje para evaluar intenciones del mismo usuario.

Tal es el caso del modelo de agentes inteligentes que simulan la interacción y negociación en un sector de organización de eventos, donde uno de los agentes toma el papel del usuario y el agente compañero es el agente vendedor [11] (López Aguilar, 2024), así se genera una negociación y una contraoferta automática según las preferencias que maximice la ganancia.

Semantic kernel

Con el SDK, podemos encontrar las funcionalidades para las negociaciones electrónicas como las siguientes:

- Procesamiento del lenguaje Natural para poder analizar el tono y contexto de las ofertas.
- Personalización de respuestas según perfil del cliente y datos previos.
- Integración con herramientas externas para optimizar estrategias de negociación.

Tal es que un sistema basado en Semantic Kernel puede analizar los patrones de compra de un usuario y generar recomendaciones personalizadas antes de iniciar la negociación.

Comparativa entre semantic kernel y autogen

Con el objetivo de optimizar las negociaciones electrónicas, este estudio se enfoca en la comparativa de dos herramientas claves y especializadas en la creación de sistemas de agentes inteligentes; Semantic kernel y Autogen, ambas desarrolladas por Microsoft.

Semantic Kernel

Semantic Kernel es un SDK de código abierto que permite integrar grandes modelos lingüísticos (LLM) en su propio código, con el kernel se puede crear aplicaciones inteligentes que comprendan y respondan mensajes de lenguaje natural (Microsoft, n.d.).

Sus principales funcionalidades son:

- Comprender el lenguaje natural.
- Orquestaciónde prompts para gestionar tareas de IA.
- Proporciona recomendaciones de alta personalización.

Este SDK es ideal para aplicaciones de IA conversacional y análisis de texto, brindando flexibilidad en la creación de agentes que su principal funcionalidad es la optimización de comunicación con el usuario.

AutoGen

Por otra parte, el API de AUTOGEN, ofrece un marco de programación de código abierto, hecho para construir agentes de IA facilitando la comparación de múltiples de agentes entre sí, algunas de sus características clave son:

- Permitir crear aplicaciones LLM con mínimo esfuerzo
- Tiene alta compatibilidad para conversaciones de diversos patrones para flujos de trabajo complejos.
- Proporciona una colección de sistemas de trabajo con diferentes complejidades.

Siendo así que AutoGen es el más adecuado para sistemas multi-agentes que requieren colaboración estructurada y toma de decisiones automatizada.

Tabla 1. Comparativa AutoGen y Semantic Kernel.

CRITERIO	MICROSOFT AUTOGEN	MICROSOFT SEMANTIC KERNEL
Enfoque principal	Multi-agentes y automatización de interacciones.	Integración de LLMs
Capacidad de personalización	Configuración limitada de agentes	Personalización alta de respuestas y funciones.
Uso de comercio electrónico	Recomendado para automatizar negociaciones e interacciones.	Útil para análisis de texto y personalización
Facilidad de implementación	Requiere configuración de agentes	Sencillo para integraciones de IA conversacional

Fuente: Elaboración propia 2025.

Con la comparación de la Tabla 1, se busca determinar cuál de estas herramientas optimiza mejor los procesos de negociación en el comercio electrónico, mejorando la eficiencia y personalización de las interacciones automatizadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Pruebas experimentales

En el trabajo "Design and implementation of a Two-Agent Prototype Applied to E-Commerce and Goods and/or Services" [11] (López Aguilar, 2024) se establece la problemática de automatización en negociaciones entre dos agentes inteligentes, se declara en esa investigación que la problemática general que se deseaba abordar era la ineficiencia en las negociaciones entorno a organizaciones de eventos, es así que plantean un modelo de dos agentes inteligentes el cual uno de ellos aborda el papel del usuario y el otro acoge el papel del comerciante, automatizando las negociaciones y reduciendo errores humanos.

La implementación de dicho modelo se realizó en ayuda del API de AutoGen, creando un entorno específico para el modelado del agente vendedor (quién toma el papel del comerciante) y comprador (el usuario) según lo mencionan, aunque los resultados de dicho artículo dicen "muestran que el agente vendedor es capaz de gestionar múltiples interacciones de forma eficiente" si bien los resultados de dicha investigación fueron bastantes conclusivos, se intenta en esta investigación el poder que otro tipo de tecnologías expertas en agentes podría hacer en el mismo entorno de comercio electrónico, específicamente en organización de eventos.

Para poder llevar a cabo una comparativa completa respecto a las dos herramientas de creación de agentes inteligentes, se implementó un prototipo donde se pone en uso el SDK de Semantic en un entorno de comercio electrónico.

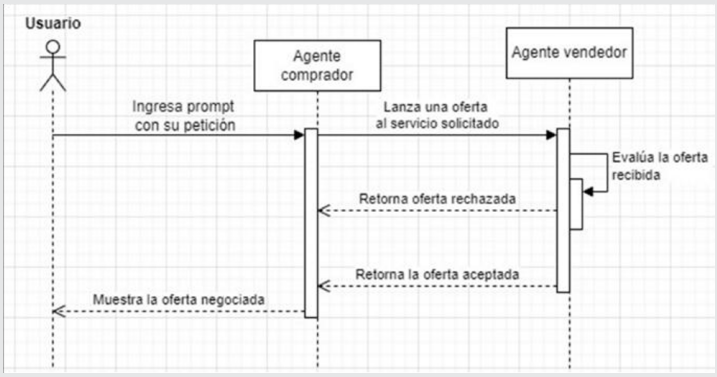


Figura 1. Diagrama de secuencia del sistema con AutoGen (Fuente: Alba & Ceballos, 2024).

Arquitectura de los agentes

El diseño imperativo de ambos agentes fue el mismo para ambas puertas de comparación, el enfoque permitió tener mayor flexibilidad y escalabilidad, la arquitectura de ambos agentes (Vendedor y Comprador), mantienen una estructura casi similar, pero con mecanismos internos de tomas de decisiones diferentes.

Agente Comprador

Este agente representa al usuario, recopilando preferencias, restricciones y objetivos de la negociación a optimizar.

- Módulo de entrada de criterios.
- Módulo de decisión.
- Módulo de comunicación.

Agente vendedor

Simula el comportamiento de un proveedor y comerciante, se encarga de ofertar propuestas en base a disponibilidad, precios y condiciones, según lo solicitado por su compañero.

- Base de datos.
- Módulo de negociación.
- Adaptador de contexto (uso de PLN).

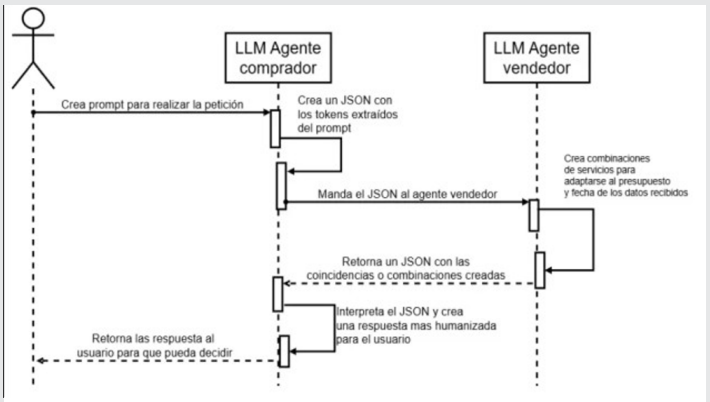


Figura 2. Diagrama de comunicación de los agentes con Semantic Kernel. (Fuente: propia, 2025)

Resultados de las pruebas experimentales
Se aplicaron un conjunto de métricas para poder determinar la factibilidad de cada uno de estos creadores de agentes inteligentes, con el fin de poder determinar las características, fortalezas, limitaciones y optimizaciones de cada uno de estos modelos de agentes inteligentes, las métricas aplicadas fueron:

Rapidez de respuesta
Aunque para ambos modelos los requerimientos fueron los mismos, para la aplicación de Semantic Kernel hubo una respuesta negativa para la métrica de rapidez, contando con un tiempo de respuesta de 5 a 10 minutos con el modelo ya afinado, sin embargo, el problema no recae en el modelo, la ineficiencia en tiempo de respuesta se debe a las limitaciones computacionales de los equipos utilizados, ya que los modelos que se utilizan para las pruebas son altamente pesados y requieren recursos computacionales con capacidad para cómputo intensivo.

Sin embargo, cabe mencionar que, si se contara con un cómputo idóneo, las respuestas serían más rápidas y precisas.

Sorprendentemente con AutoGen, los resultados con este servicio fueron satisfactorias, consta con un tiempo de respuesta de 3 segundos generando un conjunto de respuestas precisas bastante acercadas al propósito inicial, esto debido a que AutoGen no utiliza modelos de lenguajes que es el caso contrario con Semantic, con ayuda de procesamiento de lenguaje natural se extraen los tokens de los prompts, para posterior AutoGen crear los agentes, logrando encontrar comparaciones exitosas respecto a lo solicitado.

Consumo de recursos
Como se mencionó anteriormente, la ejecución de estos tipos de modelos de lenguajes especializados en poder automatizar negociaciones o procesos son enormemente pesados, complicando la compilación en dispositivos limitados en recursos de GPU, CPU y memoria RAM. Las pruebas realizadas se implementaron en equipos con unas especificaciones básicas, contando con:

- Procesador: AMD RYZEN 5 5500U con Radeon Graphic
- RAM: 16.0GB MHz 3200
- SO: Windows 11.

Con las especificaciones anteriores, y el uso de Semantic Kernel, los resultados llegan a ser difíciles de obtener, más no imposibles, la gran falta de cómputo de alto nivel nos otorga una vista algo limitada en base a lo esperado, por ejemplo, ejecutando el modelo Mistral, se usan un total de 4GB de RAM generando que el tiempo de respuesta sea lento y poco preciso, esto en base a los prompts ingresados para su análisis posterior, calificando como una respuesta lenta y poco efectiva. Se concluye con la premisa de "A mayor capacidad de equipo, mayor precisión de respuesta y optimización".

Para AutoGen, partiendo con las especificaciones mencionadas anteriormente, AutoGen nos proporciona un panorama más sencillo y menos complejo en base al requerimiento de consumo de recursos, AutoGen no impone demasiada demanda siendo es casi imperceptible, podría considerarse el uso de AutoGen como una librería más en nuestras líneas de código, siendo sencillo y amigable a los desarrolladores.

Escalabilidad
Durante la incesante pregunta respecto a la decisión sobre que herramienta sería de uso excelente para el trabajo, la curiosidad por encontrar herramientas que nos permitieran tener la oportunidad de escalar las ideas a algo más grande persistían. La escalabilidad se define como la habilidad de mantener similar o mayor el desempeño en un modelo específico [3] (Cavazos-Arroyo & Giuliani, 2017), aunque, en la informática, la escalabilidad se basa en la capacidad de un sistema de admitir cualquier incremento en demandas de recursos y capacidades de procesamientos [6] (Escalabilidad, 2025). Es así, que las comparativas nos arrojan de manera panorámicas respuestas para poder encontrar la herramienta necesaria para el cumplimiento del objetivo.

Semantic Kernel se considera de escalabilidad media-alta. Esto debido a que no está enfocado al manejo de múltiples agentes (por ello considerada media), sin embargo, es altamente escalable en integración de flujos de trabajo y orquestación de habilidades.

En aspecto de capacidad funcional, es decir, nuevas habilidades; es altamente considerable, esto referente a que permite que un mismo agente maneje grandes cantidades de habilidades o plugin. En el sentido de orquestación de tareas complejas; su gran capacidad de combinar diferentes prompts y funciones de IA se logra generar flujos de conversaciones extensos pudiendo aumentar la complejidad técnica del desarrollador.

Por otro lado, AutoGen promete una escalabilidad algo más prometedora, tomando como referencia a los mismos aspectos dichos anteriormente, referente a la escalabilidad enfocada al uso de multi-agentes es bastante alta, esto ya que pueden gestionar múltiples agentes que colaboran y compiten entre sí, más, sin embargo, en base a la funcionalidad de nuevas habilidades, es considerada media, ya que el enfoque es más hacia el lado de escalar operaciones y automatizar interacciones.

Complejidad de configuración y compatibilidad con llms

La complejidad se mide en respecto a que tanto conoces el ámbito de programación de un sistema, sin embargo, es necesario tener nociones algo amplias respecto a Python, dado que es el lenguaje en el que los agentes están siendo programados y configurados. Para Semantic Kernel, cabe mencionar que su documentación original enfocado con lenguaje C# (por lo que el conocimiento en .Net es fundamental). Dado que esta tecnología es basada en modelos de lenguaje, tiene la compatibilidad de manejar modelos como OpenIA, Ollama, onnx y anthopic, etc.

Es necesario comentar que, en este caso, para la implementación dentro del ambiente de un comercio electrónico fue necesario configurar o pulir con fine-tuning. El fine-tuning permite adaptar conocimientos que los modelos de lenguajes grandes ya poseen (responder preguntas, generar texto o clasificar texto), con el fin de mejorar su capacidad para abordar tareas más concretas y especializadas [15] (Travieso García, Á. J. 2024). Si bien, con este proceso el modelo arrojó respuestas aceptables, se debe recordar que el ambiente es un comercio de organización de eventos, por lo que la interacción con el modelo es mediante prompts, por lo que se utilizó una técnica derivada del fine-tuning llamada "Prompt Tuning", esta técnica se utiliza para ajustar y optimizar los prompts, personalizándolo y ajustándolo a la tarea específica en cuestión [14] (Saavedra, 2023) implica un ajuste más fino y ligero con respecto con otras técnicas de finura, realizando solo una modificación en la manera en la que se presentan las solicitudes, permitiendo que el modelo se adapte a diferentes contextos o tareas sin la necesidad de cambiar estructuras internas.

AutoGen, en esencia, es utilizada mediante agregarla a la cabecera de tu código como una librería, específicamente una superclase, siendo sencillo poder configurarlo como un agente que es controlado o controla gestiones y adaptaciones de procesos.

Dado que AutoGen es utilizada mediante superclases, no actúa precisamente con modelos de lenguaje, sin embargo, AutoGen cuenta con una librería que combina Semantic Kernel con AutoGen, pudiendo extraer los modelos de lenguaje y gestionarlos a gusto propios.

Documentación disponible

Semantic fue lanzado públicamente el 17 de marzo del 2023, se considera que es una tecnología de nuevo comienzo, por lo que la mayor parte del tiempo se encuentra en actualización, actualmente se hayan pequeños ejemplos de uso, pero nada extravagante, dando carta abierta a poder explotar el potencial se Semantic, para el uso en esta ocasión tomamos la versión más estable para trabajar.Por otra parte, AutoGen lleva en el mercado más tiempo que Semantic, por lo que la información para su implementación es basta y amplia, además que existen dentro de la documentación de AutoGen, distintos cursos que refuerzan el uso de los multi-agentes.

Optimización

A este punto, según la RAE (2024), optimizar es el acto de mejorar algo al máximo posible. En contexto con el proyecto, se refiere a la capacidad de las herramientas tecnológicas para maximizar la eficiencia en la comunicación, minimizar los recursos computacionales utilizados y agilizar el proceso de negociación electrónica entre los agentes inteligentes. En este sentido, Semantic Kernel muestra una alta capacidad de optimización en tareas relacionadas con el procesamiento del lenguaje natural, es así que la generación de respuestas humanizadas, y la ejecución de flujos conversacionales complejos. Sin embargo, como se había explicado antes, esto requiere de mayores recursos computacionales.

Por otro lado, AutoGen presenta una optimización sobresaliente en cuanto a eficiencia y facilidad de implementación, su arquitectura ligera ha permitido integrar en sistemas con bajos recursos sin comprometer la funcionalidad, logrando negociaciones efectivas con configuraciones mínimas.

Tabla 2: comparativa de los resultados.

Aspecto que comparar	SEMANTIC KERNEL	AUTOGEN
Rapidez de respuesta	Lenta por limitaciones computacionales	Rápida.
Consumo de recursos	Excesivo.	Bajo.
Escalabilidad	Media-alta.	Media.
Complejidad de configuración y compatibilidad	Baja con conocimientos básicos de programación	
Documentación disponible	Escasa.	Bastante.
Optimización	Muy bueno, pero con limitaciones.	Muy bueno.

Fuente: Elaboración propia 2025.

Pruebas funcionales

Aunque los resultados obtenidos nos permitan observar diferencias en cuanto a eficiencia y rapidez de optimización entre AutoGen y Semantic Kernel, no se ha realizado pruebas en un experimento sistemático de estrés que permita evaluar el comportamiento de ambas tecnologías bajo condiciones de alta carga.

El objetivo principal es evaluar el comportamiento de AutoGen y Semantic Kernel bajo condiciones de carga elevada, simulando un entorno de uso realista e intensivo en el comercio electrónico. Para evaluar este

desempeño, la prueba se realizó utilizando un equipo con las siguientes especificaciones técnicas:

• Procesador: AMD Ryzen 7 7840HS (8 núcleos, 16 hilos)
• Memoria RAM: 32 GB DDRS a 5600MH
• Almacenamiento: SSD NVMe de 1TB con velocidad de lectura de 7200 MB/s
• Tarjeta gráfica: Radeon 780M (no utilizada directamente)

Los modelos de lenguaje fueron ejecutados directamente en CPU, sin aceleración por GPU. El objetivo se evaluó mediante la rapidez de respuesta, uso de CPU/RAM y tasa de éxito bajo diferentes niveles de carga concurrente (10,50,100,200 y 500 usuarios simulados.)

Métricas evaluadas:
• Tiempo de respuesta
• Uso de CPU (%)
• Uso de RAM
• Tasa de éxito de las respuestas correctas (%)

Tabla 3. Tabla de resultados.

Carga recurrente	Tecnología	Tiempo de respuesta (ms).	Uso de CPU %	Uso de RAM %	Tasa %
10 usuarios	AutoGen	65	21%	380	100%
	Semantic Kernel	55	26%	420	100%
50 usuarios	AutoGen	120	38%	470	99%
	Semantic Kernel	110	45%	560	98%
100 usuarios	AutoGen	210	56%	570	97%
	Semantic Kernel	200	64%	670	95%
200 usuarios.	AutoGen	350	72%	700	93%
	Semantic Kernel	380	78%	850	90%
500 usuarios	AutoGen	510	86%	890	88%
	Semantic Kernel	550	93%	1100	83%

Fuente: Elaboración propia 2025.

Semantic demostró mejor repuesta a bajas cargas, con mayor capacidad de análisis semántico, aunque su consumo de RAM fue elevado a medida que aumentaban los usuarios.

AutoGen mantuvo una respuesta estable y eficiente en cargas medianas y altas, mostrando mayor tolerancia en entornos con menor recursos. Ambos sistemas funcionaron bien hasta con 100 usuarios concurrentes, donde mantuvieron tasas de éxito superiores al 95%.

Con la finalidad de reforzar la metodología, se incorporó un proceso de validación que garantiza la confiabilidad de los resultados obtenidos en las pruebas comparativas entre AutoGen y Semantic kernel, para ello, cada escenario de carga (10,50,100,200 y 500 usuarios) fue ejecutado en cinco corridas independientes, lo que permitió evaluar la repetibilidad de los experimentos. En cada métrica, desde tiempo de respuesta, uso de CPU y uso de memoria RAM, así como la tasa de éxito en las negociaciones, se calcularon valores de media, desviación, y error relativo, asegurando estadísticas de los datos. Así mismo, se realizó una prueba de estrés progresiva con incremento gradual de usuarios recurrentes hasta identificar el punto de degradación de cada una de las herramientas. Por conclusión, se establece que ambas tecnologías fueron sometidas a las mismas condiciones experimentales, lo que permitió establecer una comparación justa y confiable de los desempeños individuales.

RESULTADOS

Tras los resultados de las métricas, la percepción respecto a cuál de estas tecnologías de creación y configuración enfocadas en agentes inteligentes fuera idónea para un ambiente de comercio electrónico, las disyuntivas fueron excepcionales. Por un lado, utilizar AutoGen que es una manera fiable y amigable para un entorno con recursos limitados hablando computacionalmente, debido que su implementación es más sencilla pudiendo solo añadiéndolo como una superclase que ayuda a la realización de actividades, esta accesibilidad hace que AutoGen una herramienta útil para equipos de desarrollo pequeño, pruebas de conceptos o prototipos funcionales que buscan automatizar tareas específicas dentro de un flujo de negociación o recomendación.

Por el contrario, Semantic se vuelve más demandante por razones específicas, el uso de modelos de lenguajes son bastantes pesados, sin embargo, demostró un mayor potencial en términos de personalización, comprensión contextual y flexibilidad, aunque el uso de grandes modelos de lenguajes ayuda a comprender, analizar e incluso anticipar intenciones del usuario este nivel de sofisticación conlleva un nivel de aprendizaje profundo y con gran necesidad de optimización de rendimiento. Semantic sobresale en escenarios donde la calidad de lenguaje y respuesta personalizada es primordial.

Entonces, se concluye qué; AutoGen funciona de manera más eficaz en esquemas donde se requiere una toma de decisiones estructurada, fluida y colaborativa entre agentes autónomos. Mientras que Semantic so-

bresale en escenarios donde la calidad de lenguaje y respuesta personalizada es primordial.

La elección de una y otra herramienta depende en gran magnitud en el contexto del proyecto, los recursos y objetivos específicos que se le quieran otorgar a los agentes.

CONCLUSIONES

Esta comparativa no se trata sobre cual herramienta es superior a la otra, sino de que soluciones responden a necesidades diferentes, el análisis refuerza la idea de la integración correcta y estratégica de herramientas adecuadas en el desarrollo de agentes inteligentes que marcan la diferencia significativa en conceptos de escalabilidad, eficiencia, experiencia de usuario y facilidad de implementación [13] (Russel & Norving, 2021; Hernández y Martínez, 2024) y uso dentro del marco del comercio electrónico.

Los hallazgos obtenidos en este estudio tienen una aplicación directa en plataformas de e-commerce que buscan optimizar procesos de negociación, personalización y toma de decisiones. En particular, el uso de Semantic Kernel resulta adecuado para escenarios donde la prioridad de la interacción conversacional avanzada con los usuarios, como en chatbots de atención al cliente o sistemas de recomendación en tiempo real. Por otro lado, AutoGen se muestra especialmente útil en entornos donde es necesario coordinar múltiples agentes colaborativos, como es el caso de la negociación automática entre proveedores, clientes y plataformas intermediarias, reduciendo tiempos y costos operativos.

En contexto más prácticos, estos resultados sugieren que las empresas de comercio electrónico pueden integrar ambas tecnologías de manera complementaria: Semantic kernel para mejorar la experiencia del usuario final y AutoGen para la integración de gestión automatizada de negociaciones complejas y procesos internos, abriendo la posibilidad de desarrollar soluciones híbridas que no solo incrementen la eficiencia técnica, si no también generar ventajas competitivas en entornos de producto digitales.

En las menciones de trabajos recientes, aborda el éxito de los agentes inteligentes no solo depende de la arquitectura misma de ellos, sino de su adecuada alineación con las metas específicas del sistema [10] (Jurafsky & Martin, 2022). En futuras investigaciones, se propone aplicar estas herramientas en entorno reales y medir su impacto en términos de rendimiento de satisfacción del usuario y retorno de inversión.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Aceituno-Madera, P. et al (2011). Melanoma, altitud y radiación uvb. Actas dermo-sifiliograficas, 102(3): 199-205.

[2] Acosta, E., Fierro, et al. (2009). Melanoma: patogénesis, clínica e histopatología. Consultada el13 del 09 del 2023.

[3] Ali, M., Tang, et al. (2020). Algoritmo semantic-k-nn: una versión mejorada del algoritmo k-nn tradicional. ISSN: 0957-4174, 151.

[4] Arias, V. et al. (2019). Una introducción a las aplicaciones de la inteligencia artificial en medicina: Aspectos históricos. Revista Latinoamericana de Hipertensión, 14(5):590–600.

[5] Artola Moreno Á. (2019). Clasificación de imágenes usando redes neuronales convolucionales en Python. pages 28–29.

[6] Barrios Tao, H. et al. (2020). Subjetividades e inteligencia artificial: desafíos para 'lo humano'.Veritas, (47):81–107.

[7] Bernal-de Lazaro, J. et al. (2011). Estudio comparativo de clasificadores empleados en el diagnostico de fallos de sistemas industriales. Ingeniería Mecánica, 14(2):87–98.

[8] Bonilla Carrión, C. (2020). Redes convolucionales. page 16.

[9] Duran Suarez, J. (2017). Redes neuronales convolucionales en r: Reconocimiento de caracteres escritos a mano. page 25.

[10] Hardy, T. (2001). Ia (inteligencia artificial). Polis: Revista Latinoamericana, (2):18.

[11] Herrera, J. C. a. et al. (2016). Diseño de un sistema automático de selección de frutos de café mediante técnicas de visión artificial. Revista UIS ingenierías, 15(1):7–14.

[12] Infante Carbonell, M. G. et al. (2019). Melanoma cutáneo: algunas consideraciones actuales. Medisan, 23(1):146–164.

[13] Leitner, R. (2006). Epidemiología del melanoma cutáneo. Revista argentina de dermatología, 87(2):86–97.

[14] Lucero Carrillo, E. D. et al. (2016). Utilización de técnicas de visión artificial para la detección automática de defectos externos del mango.

[15] Lugo-Reyes, Saúl Oswaldo, a. o. (2014). Inteligencia artificial para asistir el diagnóstico clínico en medicina. Revista Alergia México, 61(2):110–120.

[16] Maria Zuluaga, A. I. et al. (2016). Actualización en el tratamiento quirúrgico del melanoma cutá-

neo primario y metastásico. Cirugía y Cirujanos, 84(1):77–84.

[17] Micó, M. (1996). Algoritmos de búsqueda de vecinos más próximos en espacios métricos. PhD thesis, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

[18] M.L. Villalobos León, R. M. V. et al. (2013). Melanoma. Medicine-Programa de Formación Médica Continuada Acreditado, 11(26):1597–1607.

[19] Mordoh, A. (2009). clínica del melanoma. Acta bio-química clínica latinoamericana, 43(3):327–331.

[20] Narváez Vilema, M. E. et al. (2021). Predicción de clientes potenciales utilizando k vecino más cercano en el área de negocios de la cooperativa Riobamba.

[21] Nguyen Cong, R. P. et al. (2015). Aprendizaje super-visado de funciones de distancia: estado del arte. Revista Cubana de Ciencias Informáticas, 9(2):14–28.

[22] Porcelli, A. M. (2020). La inteligencia artificial y la robótica: sus dilemas sociales, éticos y jurídicos. Derecho global. Estudios sobre derecho y justicia, 6(16):49–105.

[23] Sordo, C. and Gutiérrez, C. (2013). Cáncer de piel y radiación solar: experiencia peruana en la prevención y detección temprana del cáncer de piel y melanoma. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica, 30:113–117.

[24] Vega, M. Á. et al. (2020). Inteligencia artificial y aprendizaje automático en medicina. Revista médica sinergia, 5(8):e557–e557Zaballos, P. et al. (2004). Criterios dermatoscopicos para el diagnóstico del melanoma. Med Cutan Iber Lat Am, 32(1):3–17.

[25] Zaballos, P. et al. (2004). Criterios dermatoscópicos para el diagnóstico del melanoma. Med Cutan Iber Lat Am, 32(1):3–17.

Ciencias de la Computación

Ingeniantes

SmartReview: Revisión Inteligente de Literatura Científica Asistida Localmente

Colaboración
Pedro Antonio Ibarra Facio; Oliver Sánchez Corona;Walter Alexander Mata López; Mónica Cobián Alvarado; Carlos Alberto Torres Cantero, Universidad de Colima

Fecha de recepción: 25 de agosto de 2025
Fecha de aceptación: 13 de septiembre de 2025

RESUMEN: La creciente sobrecarga informativa y la necesidad de confidencialidad en la revisión de literatura científica exigen soluciones innovadoras. Este artículo presenta SmartReview, una herramienta de código abierto que opera exclusivamente en el entorno local del usuario para garantizar la privacidad total. Su principal innovación es un RAG modificado que procesa PDFs página a página, generando resúmenes estructurados concisos que preservan el núcleo semántico, que a diferencia del chunking convencional. La herramienta integra OCR, clasificación temática y una interfaz de chat interactiva. Para demostrar su viabilidad, se realizó una validación funcional sobre un corpus de 25 artículos científicos. Los resultados cuantitativos iniciales son prometedores, reportando tiempos de procesamiento promedio de 4.1 segundos por página y una notable reducción del contenido textual en un factor aproximado de 28.5x. Esto disminuye significativamente los requerimientos computacionales del LLM local, perfilando a SmartReview como una alternativa segura y robusta a los servicios en la nube.

PALABRAS CLAVE: Revisión de literatura, RAG, Confidencialidad de datos, Inteligencia artificial, LLM.

ABSTRACT: The growing information overload and the need for confidentiality in scientific literature review demand innovative solutions. This paper presents SmartReview, an open-source tool operating exclusively on the user's local environment to ensure total privacy. Its main innovation is a modified Retrieval-Augmented Generation (RAG) approach that processes PDFs page-by-page, generating ultra-concise structured summaries that preserve semantic core content, in contrast to conventional chunking methods. The tool integrates Optical Character Recognition (OCR), thematic classification, and an interactive chat interface. To demonstrate its feasibility, a functional validation was performed on a corpus of 25 scientific articles. Initial quantitative results are promising, showing average processing times of 4.1 seconds per page and a remarkable reduction in textual content by a factor of approximately 28.5x. This significantly decreases the computational demands on the local Large Language Model (LLM), positioning SmartReview as a secure and robust alternative to cloud-based services.

KEYWORDS: Literature review, RAG, Data confidentiality, Artificial intelligence, LLM.

INTRODUCCIÓN

La revisión de literatura es un primer paso crucial en cualquier investigación, ya que ayuda a entender el conocimiento existente sobre un tema, encontrar áreas poco estudiadas y conectar ideas con el propio trabajo [1]. No obstante, el volumen de publicaciones científicas crece a diario, lo que dificulta enormemente a los investigadores leer, resumir y organizar tanta información [2], [3].

Recientemente, la inteligencia artificial (IA), y en particular los grandes modelos de lenguaje (LLM), han demostrado una gran capacidad para analizar, clasificar y generar texto, acelerando significativamente la revisión de literatura [4]. Herramientas en línea como ChatPDF o Paperpal son un ejemplo de ello, aunque presentan un gran inconveniente: al funcionar en la nube, exigen subir los documentos a servidores de terceros. Esta práctica genera un serio problema

de confidencialidad, pues en investigación se manejan a menudo datos sensibles o borradores no publicados. La subida de estos documentos a servicios externos infringe normativas institucionales y de organismos como los NIH, que prohíben el uso de procesadores externos para analizar información confidencial, una limitación que impide a muchos investigadores aprovechar estas útiles herramientas.[5], [6].

Para solucionar este problema, se presenta SmartReview, una plataforma web diseñada para funcionar localmente en la computadora del usuario. El objetivo es resolver dos desafíos a la vez: la gran cantidad de información y la necesidad de mantener los datos privados. Para ayudar con la revisión de literatura, se ofrecen cuatro funciones principales: (1) Obtener texto de archivos PDF, (2) clasificar automáticamente los textos por temas, (3) un sistema propio de búsqueda y respuesta basado en los documentos, (4) una interfaz de chat para hacer preguntas sobre uno o varios documentos.

La principal novedad de SmartReview es el procesamiento de documentos para hacer consultas eficientes localmente mediante su método de Generación Aumentada por Recuperación (RAG, por sus siglas en inglés). En lugar de cortar los documentos en pedazos pequeños (técnica conocida como chunking), que a veces puede separar ideas importantes, SmartReview crea resúmenes cortos y estructurados de cada página (con título, puntos clave y conclusión, usualmente menos de 30 tokens). Esto reduce mucho el tamaño de la información que el sistema necesita manejar (de unos 700-800 “tokens” por página a menos de 30 por resumen), pero conservando las ideas principales, lo cual permite ahorrar recursos manteniendo el sentido del texto original. Gracias a estos resúmenes por página y a una forma específica de dar instrucciones al LLM (lo que se explicará en la sección de metodologia), SmartReview encuentra la información más importante en documentos largos o en varios archivos a la vez, usando una cantidad moderada de recursos computacionales y manteniendo todo privado.

Es importante mencionar que estamos en pruebas para medir exactamente qué tan bien funciona SmartReview (precisión, velocidad). Finalmente, discutimos las limitaciones actuales y posibles mejoras futuras, desarrollando una visión completa de esta herramienta para la revisión bibliográfica confidencial.

Revisión de la literatura

El proceso para elaborar un estado del arte, que incluye el buscar, seleccionar, organizar e interpretar un gran volumen de fuentes es normalmente complejo y consume mucho tiempo [1]. Esto se ha intensificado debido a la creciente disponibilidad de literatura digital y al aumento exponencial de publicaciones científicas, lo que ha impulsado la búsqueda de tecnologías que automatizan y optimizan la revisión bibliográfica [3].

Herramientas existentes y el problema de la confidencialidad

La mayoría de las implementaciones RAG disponibles, al igual que muchos servicios LLM, dependen del procesamiento en la nube, lo que implica transferir documentos normalmente confidenciales a servidores externos. Esta práctica puede incumplir normativas y políticas de privacidad institucionales o de organismos como los NIH [5], [7]. Adicionalmente, la propia base de conocimiento utilizada en RAG introduce una nueva superficie de ataque: estudios recientes como PoisonedRAG demuestran que es factible corromper la base de conocimiento inyectando textos maliciosos para inducir respuestas incorrectas específicas en el LLM [8], un riesgo significativo si se depende de bases de conocimiento externas o colaborativas.

Generación aumentada por recuperación (RAG)

En este contexto, la Generación Aumentada por Recuperación se ha consolidado como una técnica que combina la capacidad generativa de los LLM, con la precisión de la información recuperada en tiempo real desde fuentes de conocimiento externas [9]. Este enfoque mejora las limitaciones de los LLM, como el conocimiento desactualizado y la tendencia a la alucinación, al basar las respuestas del modelo en evidencia verificable [10], [11]. El proceso RAG estándar implica típicamente: 1) un recuperador (retriever) que selecciona documentos relevantes de una base de conocimiento dada una consulta, y 2) un generador (LLM) que utiliza estos documentos, usualmente concatenados a la entrada de texto original, como contexto para producir la respuesta final [12].

El proceso RAG estándar no está exento de limitaciones. Su efectividad depende críticamente de la calidad de la recuperación [13], ya que información irrelevante o de baja calidad puede perjudicar la generación final [11]. Además, existe una desconexión inherente o “brecha semántica” entre los recuperadores y los LLM generativos, lo que dificulta que el LLM comprenda por qué ciertos documentos fueron seleccionados. La simple concatenación de información como contexto puede sobrecargar al LLM, especialmente con documentos largos, llevando a problemas como la pérdida de información en el medio del contexto [14].

Para superar estas limitaciones, han surgido técnicas RAG avanzadas. Algunas buscan mejorar la interacción entre el recuperador y el generador o la robustez ante recuperaciones imperfectas. Por ejemplo, CRAG introduce un evaluador de recuperación y mecanismos de autocorrección [11]. Otros enfoques, como R2AG, proponen integrar información sobre el

proceso de recuperación en la entrada del LLM [14], y Parametric RAG busca inyectar conocimiento directamente en los parámetros del LLM [12].

Mientras que RAG y sus variantes ofrecen un gran potencial para automatizar la revisión de literatura [10], persisten problemas relacionados con la calidad de la recuperación, el manejo de documentos largos y la falta de soluciones que garanticen la confidencialidad mediante el procesamiento estrictamente local. Es en este sentido donde surge la necesidad de una herramienta RAG eficiente, local y segura, es aquí donde SmartReview ofrece un enfoque metodológico para la interacción con la literatura académica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

La arquitectura del sistema se construyó con herramientas de código abierto. El backend se desarrolló en Python, utilizando la biblioteca Streamlit para la interfaz gráfica, PyMuPDF para la extracción de texto y easyocr para el reconocimiento óptico de caracteres (OCR). La inferencia del modelo de lenguaje se gestionó mediante Llama.cpp.

Todo el sistema se ejecutó en un equipo con un CPU AMD Ryzen 7 5700G, 64 GB de RAM y una GPU NVIDIA RTX 3090, bajo el sistema operativo Windows 11. El modelo de lenguaje empleado fue Meta-Llama-3.2-8B-Instruct, configurado con una cuantización Q8_0, una temperatura de 0.8 y una ventana de contexto de 32,768 tokens.

La operación de SmartReview se basa en dos flujos principales desacoplados: un flujo de preprocesamiento para preparar los datos y un flujo de consulta para interactuar con ellos. La Figura 1 ilustra el ciclo operativo general del sistema.

Figura 1. Diagrama a bloques de la aplicación web para exámenes rápidos con IA generativa.
Fuente: Elaboración propia.

Métodos

Se inicia con el flujo de preprocesamiento y construcción de la base de conocimiento, este flujo se ejecuta una sola vez por cada conjunto de documentos para preparar la información de cara a consultas eficientes. Consta de las siguientes etapas (ver Figura 2):

a) Etapa de carga y extracción de Texto: El usuario carga los documentos PDF a través de la interfaz. El sistema extrae el texto plano, aplicando OCR si es necesario.

b) Etapa de clasificación temática: El LLM local analiza una porción inicial (resumen o primera página) para asignar etiquetas temáticas.

c) Etapa de segmentación y generación de resúmenes estructurados por página: En lugar de usar la técnica de chunking, se procesa el documento página por página. Para cada una, genera un resumen estructurado y conciso (título, puntos clave e idea principal) de menos de 30 tokens.

d) Etapa de almacenamiento estructurado: La información procesada (texto original por página, resumen estructurado, etiqueta temática) se guarda localmente en archivos JSON, manteniendo la relación explícita entre resúmenes y texto completo.

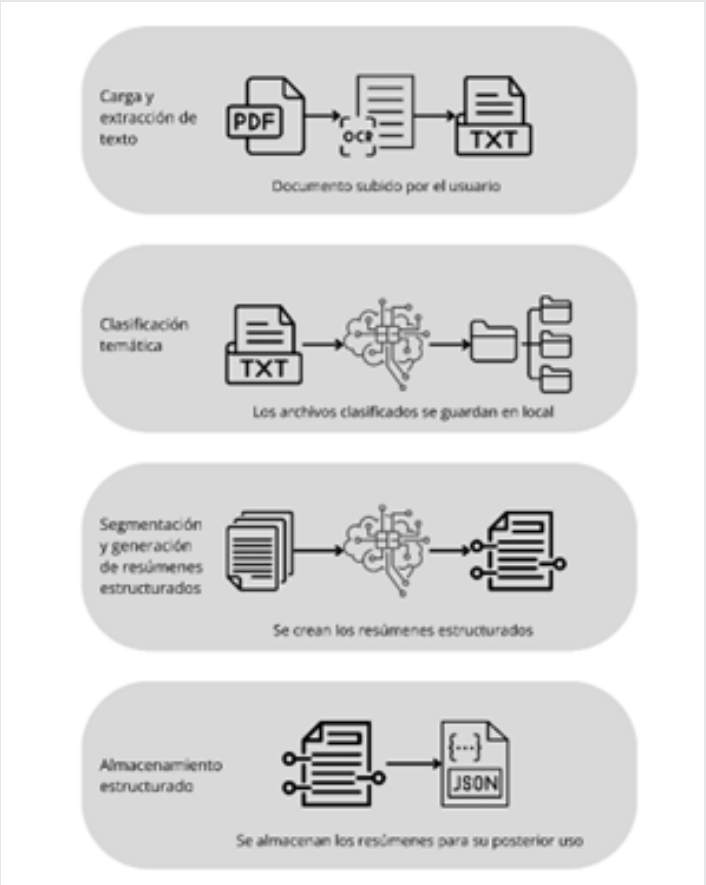


Figura 2: Flujo del proceso de preprocesamiento.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez construida la base de conocimiento, el usuario interactúa mediante la interfaz de chat y se activa el flujo de consulta y generación de respuestas, el cual consiste en las siguientes etapas, las cuales se ilustran en la Figura 3.

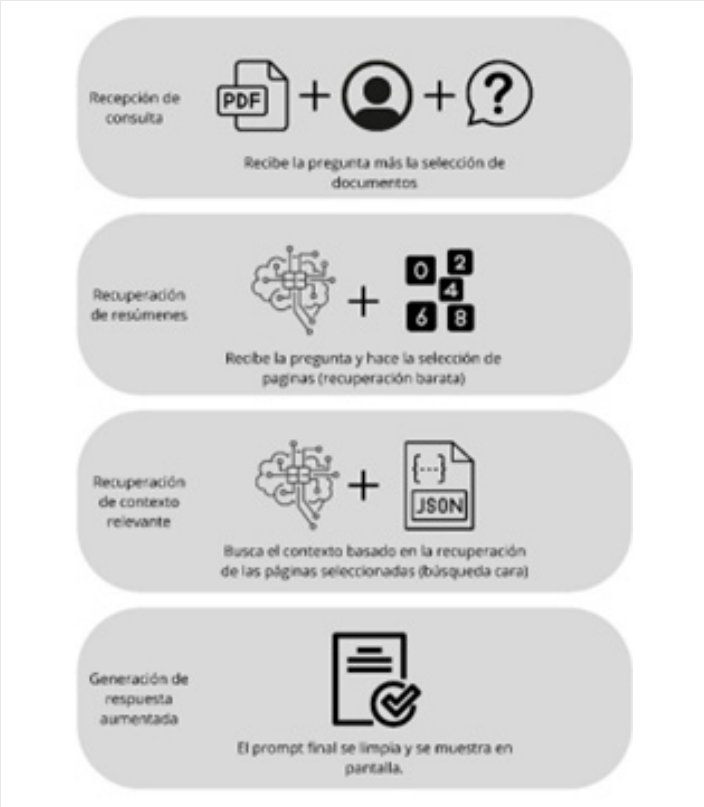


Figura 3: Flujo del proceso de consulta.
Fuente: Elaboración propia.

a) Etapa de recepción de consulta: El usuario formula una pregunta, específica o general, sobre uno o más documentos.

b) Etapa de recuperación basada en resúmenes: El LLM compara semánticamente la consulta con los resúmenes almacenados para identificar las páginas más relevantes.

c) Etapa de recuperación de texto completo relevante: El sistema recupera de la base local únicamente el texto original de las páginas identificadas como relevantes.

d) Etapa de generación de respuesta aumentada: Se construye un prompt para el LLM que incluye la consulta original y el texto recuperado para generar la respuesta, incluyendo citas a los números de página.

Detalles de implementación.
La efectividad del sistema depende en gran medida del diseño de las instrucciones enviadas al LLM por lo que se diseñaron dos prompts principales:
1) Prompt de resumen por página: Para la fase de preprocesamiento, se diseñó una instrucción que le pide al LLM analizar el texto de una página y devolver un resumen estructurado en formato JSON. El prompt instruye al modelo para que identifique un título tentativo, 2-3 puntos clave y una idea principal, con una restricción de longitud total de menos de 30 tokens.

2) Prompt de Consulta Final (RAG): Para generar la respuesta al usuario, se construye un prompt final que incluye: (a) el rol del asistente, (b) la instrucción de basar la respuesta exclusivamente en el contexto proporcionado, (c) el texto completo de las páginas relevantes recuperadas, (d) la pregunta original del usuario, y (e) la orden de citar los números de página de las fuentes utilizadas.

Validación y confidencialidad
La validación funcional se realizó utilizando un corpus de 25 artículos científicos para simular un escenario de revisión de literatura realista. El proceso incluyó una evaluación cualitativa de la eficiencia, donde se observó una aceleración significativa del proceso: el análisis del corpus completo con SmartReview tomó 4 días, en contraste con las 3 semanas que requirió una revisión manual tradicional realizada por dos de los coautores. Adicionalmente, se validó la confidencialidad como pilar fundamental del diseño. Al ejecutar todos sus componentes (extracción, resumen, clasificación y el LLM) de forma estrictamente local, SmartReview garantiza que los documentos y las consultas nunca abandonan el equipo del usuario. Este enfoque no solo elimina los riesgos de privacidad, sino que asegura el cumplimiento de normativas institucionales estrictas como las del NIH, consolidando la herramienta como una alternativa segura y eficiente para la investigación.

RESULTADOS

La validación funcional de SmartReview se realizó en un entorno local con un corpus de 25 artículos científicos. Las pruebas demostraron la operatividad de la herramienta, logrando una extracción completa del texto y generación de resúmenes estructurados para cada página. El principal resultado cuantitativo de este proceso fue una reducción de la representación textual a menos de 30 tokens por resumen, sin pérdida en calidad semántica. Para cuantificar la eficiencia general, se midieron las métricas de rendimiento del preprocesamiento, presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1: Métricas de rendimiento del preprocesamiento para el corpus de 25 Artículos.

Métrica	Valor Total	Valor Promedio (por página)
Documentos procesados	25	N/A
Páginas procesadas	443	N/A
Tiempo de procesamiento	1816 s (30.3 min)	4.1 s
Tokens originales	328,936	~740
Tokens resumidos	~11,500	~26
Factor de reducción de contexto	~28.5x	N/A

Fuente: Elaboración propia.

Estos valores confirman la viabilidad del enfoque de SmartReview en hardware de escritorio. Un tiempo de procesamiento promedio de 4.1 segundos por página es un resultado práctico, considerando que incluye la operación de OCR. El hallazgo más significativo es la reducción del volumen de información en un factor aproximado de 28.5x, lo que permite al LLM local gestionar el contexto de múltiples documentos de manera eficiente, optimizando el uso de recursos computacionales. Las comparativas formales con otros métodos se proponen como trabajo futuro.

Además de la eficiencia cuantitativa, se validó la funcionalidad del flujo de consulta interactiva. Como se muestra en la Figura 4, la interfaz de usuario permite a los usuarios seleccionar documentos y formular consultas complejas en lenguaje natural sobre el corpus cargado.

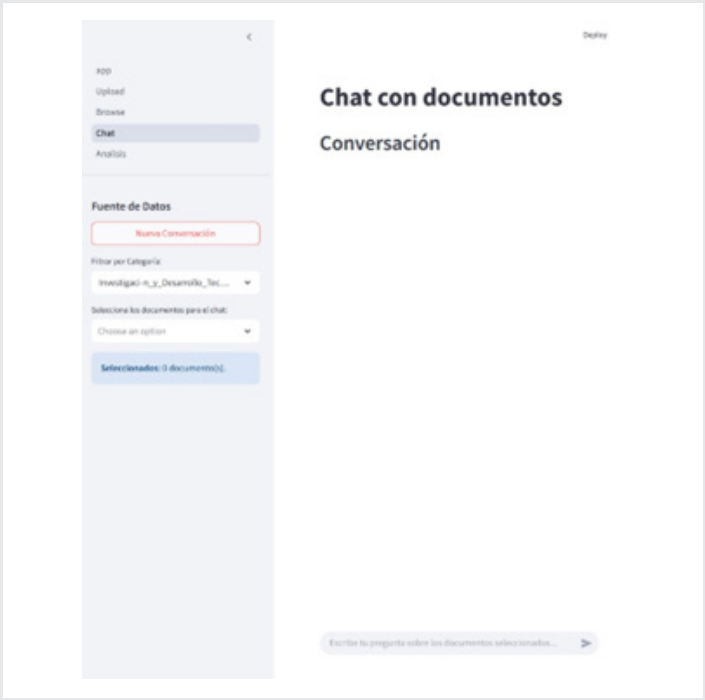


Figura 4: Interfaz de usuario de SmartReview. Se muestra la pantalla principal donde el usuario selecciona los documentos del corpus y formula una consulta en lenguaje natural.
Fuente: Elaboración propia.

Tras recibir la consulta, el sistema identificó correctamente las páginas relevantes mediante la comparación semántica con los resúmenes almacenados y recuperó selectivamente el texto completo original. Basándose exclusivamente en este contexto local, el LLM generó respuestas coherentes e informativas. La Figura 5 ejemplifica una de estas respuestas, donde el sistema fundamenta sus afirmaciones con referencias precisas a las páginas de los documentos fuente. Todo el proceso, desde la carga hasta la respuesta, se ejecutó sin conexión a redes externas, garantizando la confidencialidad.

Figura 5: Ejemplo de respuesta generada por el sistema. Tras una consulta comparativa, SmartReview sintetiza la información de múltiples fuentes y fundamenta sus afirmaciones con referencias explícitas a las páginas de los documentos originales.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Discusión

SmartReview ha demostrado ser funcional en un entorno local que garantiza la confidencialidad de los datos durante el análisis de literatura. El enfoque RAG modificado, basado en resúmenes por página, ha permitido la recuperación de información relevante y la generación de respuestas contextualizadas en nuestra validación inicial con 25 artículos. Los resultados cuantitativos de la Tabla 1 son un aporte clave especialmente el factor de reducción de contexto de ~28.5x confirma que la carga computacional se reduce significativamente, haciendo viable el uso de LLM en hardware de escritorio. No obstante, el tiempo de procesamiento de 4.1 s/página demuestra que el OCR es un cuello de botella importante a mejorar. La evaluación actual es principalmente funcional; reconocemos como limitación principal la falta de una validación cuantitativa con métricas estándar y un corpus de mayor tamaño, aspectos a los que se otorgará prioridad en trabajos futuros.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta y valida SmartReview, una herramienta que permite el análisis y consulta confidencial de documentos académicos mediante un LLM local. Se demuestra la efectividad de su enfoque RAG modificado, que opera sin conexión para garantizar una recuperación eficiente y sobre todo una generación de respuestas precisa. Su principal contribución es ofrecer una alternativa segura y local frente a herramientas dependientes de la nube, abordando preocupaciones de privacidad y cumplimiento normativo en investigación. El trabajo futuro se centrará en una validación cuantitativa rigurosa con métricas estandarizadas, pruebas de escalabilidad con un corpus ampliado no pasando por alto la optimización del rendimiento para mejorar la accesibilidad de la herramienta.

BIBLIOGRAFÍA

[1] S. T. Molopa and J. Cronje, "Artificial intelligence-based literature review adaptation," SA Journal of Libraries and Information Science, vol. 90, no. 2, 2024. doi:10.7553/90-1-2390.

[2] C. B. Asmussen and C. Møller, "Smart literature review: A practical topic modelling approach to exploratory literature review," Journal of Big Data, vol. 6, no. 1, pp. 1-18, 2019. doi:10.1186/s40537-019-0255-7.

[3] F. Bolaños, A. Salatino, F. Osborne, et al., "Artificial intelligence for literature reviews: Opportunities and challenges," Artificial Intelligence Review, vol. 57, p. 259, 2024. doi:10.1007/s10462-024-10902-3.

[4] D. A. Tovar, "AI literature review suite," arXiv:2308.02443, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2308.02443.

[5] M. Lauer, S. Constant, and A. Wernimont, "Using AI in peer review is a breach of confidentiality," NIH Extramural Nexus, Jun. 23, 2023. [Online]. Available: https://nexus.od.nih.gov/all/2023/06/23/using-ai-in-peer-review-is-a-breach-of-confidentiality/.

[6] O. Ngwenyama and F. Rowe, "Should we collaborate with AI to conduct literature reviews? Changing epistemic values in a flattening world," Journal of the Association for Information Systems, vol. 25, no. 1, pp. 122-136, 2024. doi:10.17705/1jais.00869.

[7] J. Evertz, M. Chlosta, L. Schönherr, and T. Eisenhofer, "Whispers in the machine: Confidentiality in LLM-integrated systems," arXiv:2402.06922v3, 2024. doi: 10.48550/arXiv.2402.06922.

[8] W. Zou, R. Geng, B. Wang, and J. Jia, "PoisonedRAG: Knowledge corruption attacks to retrieval-augmented generation of large language models," arXiv:2402.07867v3, 2024. doi:10.48550/arXiv.2402.07867.

[9] P. Lewis, et al., "Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks," in Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 33, H. Larochelle, M. Ranzato, R. Hadsell, M. Balcan, and H. Lin, Eds. Curran Associates, Inc., 2020, pp. 9459-9474.

[10] B. Han, T. Susnjak, and A. Mathrani, "Automating systematic literature reviews with retrieval-augmented generation: A comprehensive overview," Applied Sciences, vol. 14, no. 19, p. 9103, 2024. doi: 10.3390/app14199103.

[11] S.-Q. Yan, J.-C. Gu, Y. Zhu, and Z.-H. Ling, "Corrective retrieval augmented generation," arXiv:2401.15884v3, 2024. doi: 10.48550/arXiv.2401.15884.

[12] W. Su, et al., "Parametric retrieval augmented generation," arXiv:2501.15915, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2501.15915.

[13] A. Salemi and H. Zamani, "Evaluating retrieval quality in retrieval-augmented generation," in Proceedings of the 47th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR '24), 2024, pp. 2395-2400. doi:10.1145/3626772.3657957.

[14] F. Ye, S. Li, Y. Zhang, and L. Chen, "R2AG: Incorporating retrieval information into retrieval augmented generation," in Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2024, Y. Al-Onaizan, M. Bansal, and Y.-N. Chen, Eds. Association for Computational Linguistics, 2024, pp. 11584-11596. doi: 10.18653/v1/2024.findings-emnlp.678.

[15] J. W. Creswell, Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches, 2nd ed. Sage Publications, 2003.

ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, Vol 33, Issue 5. Article No.: 135, pp: 1-50. DOI: https://doi.org/10.1145/3652154.

[9] Kuck, K. (2023). Generative Artificial Intelligence: A Double-Edged Sword. 2023 World Engineering Education Forum - Global Engineering Deans Council (WEEF-GEDC), 1-10. DOI: 10.1109/WEEF-GEDC59520.2023.10343638.

[10] Eager, B., & Brunton, R. (2023). Prompting higher education towards AI-augmented teaching and learning practice. En: Journal of Universi-

ty Teaching & Learning Practice, 20(5), 02. DOI: 10.53761/1.20.5.02.

[11] The Pallet Projects. (2023). Welcome to Flask Flask Documentation (3.0.x). En Palletsprojects. com. Disponible en: https://flask.palletsprojects. com/en/3.0.x/.

[12] PyPI.org. (2023). Google Bard API para Python. Sitio oficial para descarga de la librería para Python en PyPI. Disponible en: https://pypi. org/project/bardapi/.

[13] Yiu, E. et al. (2023). Transmission Versus Truth, Imitation Versus Innovation: What Children Can Do That Large Language and Language-and-Vision Models Cannot (Yet). En: Perspectives on Psychological Science. https://journals.sagepub.com/ doi/full/10.1177/17456916231201401.

[14] Anthropic. (2023). Claude - Asistente de IA Generativa. En línea. Disponible en: http://www. claude.ai.

[15] OpenJS-Foundation (2023) Node.js. Disponible en: https://nodejs.org/en.

[16] ExpressJS.com (2017) Express JS -Node.js web application framework. Sitio official. Disponible en: https://expressjs.com/.

Ciencias de la Computación

Ingeniantes

Predicción de glucosa en niños con DMT1 en ventanas de 30 minutos mediante XGBoost y simulación fisiológica

Colaboración
Olaf Gustavo Sandoval Vázquez; Raquel Ochoa Ornelas; Julio Alberto García Rodríguez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán

Fecha de recepción: 23 de septimbre de 2025
Fecha de aceptación: 28 de septiembre de 2025

RESUMEN: La Diabetes Mellitus Tipo 1 (DMT1) en niños requiere un monitoreo constante debido a la complejidad glucémica de esta población. Este trabajo presenta un modelo predictivo basado en el algoritmo XGBoost, entrenado con datos simulados de 10 pacientes pediátricos virtuales mediante el entorno DMMS.R. El modelo estima niveles futuros de glucosa en ventanas de 30 minutos. Los resultados exhiben un desempeño robusto, con un RMSE de 5.48 mg/dL, MAE de 3.31 mg/dL y un coeficiente de determinación R^2 de 0.9949. Los resultados presentados apoyan la utilidad de la propuesta como una herramienta computacional de apoyo en el tratamiento personalizado de la DMT1 pediátrica.

PALABRAS CLAVE: Diabetes Mellitus Tipo 1, XGBoost, Modelo predictivo, Herramienta computacional.

ABSTRACT: Type 1 Diabetes Mellitus (T1DM) in children requires constant monitoring due to the glycemic complexity of this population. This study presents a predictive model based on the XGBoost algorithm, trained with simulated data from 10 virtual pediatric patients using the DMMS.R environment. The model estimates future glucose levels in 30-minute windows. The results exhibit robust performance with an RMSE of 5.48 mg/dL, MAE of 3.31 mg/dL, and a coefficient of determination R^2 of 0.9949. The results presented support the usefulness of the proposal as a computational tool to support personalized treatment of pediatric T1DM.

KEYWORDS: Type 1 Diabetes Mellitus, XGBoost, Predictive Model, Computational Tool.

INTRODUCCIÓN

La Diabetes Mellitus Tipo 1 (DMT1) se caracteriza por un déficit grave de insulina, la cual es la hormona más importante para la regulación de la glucosa sanguínea. Todas las formas de Diabetes aparecen por una destrucción autoinmune y progresiva de las células beta en el páncreas. Sin embargo, la velocidad de destrucción celular es considerablemente más acelerada en lactantes, niños y adolescentes en comparación con los adultos, lo que agrava el curso clínico y complica su manejo terapéutico. Esta pérdida funcional desencadena desequilibrios metabólicos significativos y en ausencia de una intervención oportuna, puede conducir a complicaciones graves en el corto y largo plazo [1]. En las últimas décadas, el impacto de la DMT1 ha cobrado mayor relevancia como problema de salud pública. Datos recientes estiman que más de 8.4 millones de personas viven con esta condición en el mundo, y se proyecta que la cifra podría superar los 13 millones para el año 2040. Las desigualdades geográficas, económicas y políticas agravan el panorama [2]. En este sentido, se vuelve esencial replantear las estrategias de monitoreo y control de la enfermedad, especialmente en población pediátrica. El avance de tecnologías digitales, el acceso a grandes volúmenes de datos y el uso de modelos de aprendizaje automático han abierto nuevas oportunidades para anticipar alteraciones glucémicas sin recurrir exclusivamente a métodos invasivos. Algoritmos como el XGBoost han demostrado capacidad para detectar patrones complejos en variables como la glucosa, la insulina y la actividad física [3], permitiendo diseñar sistemas predictivos más sensibles a la dinámica fisiológica individual. Esta línea de investigación se dirige hacia propuestas con un enfoque preventivo, personalizado y accesible para el tratamiento de DMT1 [4]. Al adaptar estos modelos a la fisiología infantil, se han identificado características únicas, como una mayor sensibilidad a la insulina, mayor volumen de distribución relativo al peso corporal y una tasa de absorción de glucosa más elevada, lo que exige ajustes específicos en la calibración del sistema [5]. Incluso factores como la actividad física pueden alterar significativamente la respuesta a la insulina, modificando los parámetros fisiológicos [6]. Esto confirma la necesidad de integrar parámetros fisiológicos relevantes en herramientas tecnológica y computacionales orientadas al apoyo clínico.

Esta investigación forma parte de un proyecto interdisciplinario en ingeniería biomédica e inteligencia artificial. El enfoque metodológico combina simulación computacional, diseño experimental y análisis estadístico. La principal contribución es el desarrollo de un modelo predictivo que integra simulación fisiológica y aprendizaje automático para estimar niveles de glucosa con un horizonte de 30 minutos. En la sección de materiales y métodos se describe el proceso de simulación fisiológica y el entrenamiento del modelo XGBoost. En los resultados se presentan las métricas de desempeño obtenidas. Finalmente, en las conclusiones se discute el potencial como herramienta de apoyo para el monitoreo personalizado de la DMT1 pediátrica.

MATERIALES Y MÉTODOS

La sección de materiales y métodos describe el proceso para desarrollar y evaluar el modelo predictivo propuesto. Se detallan las etapas de simulación fisiológica mediante el entorno DMMS.R (del inglés: Diabetes Mellitus Metabolic Simulator for Research), la construcción de la base de datos, el diseño computacional para el entrenamiento del modelo XGBoost y la evaluación del desempeño mediante métricas especializadas. Esta estructura metodológica permite comprender cómo se obtienen los resultados presentados en este manuscrito.

Simulación de Datos: Entorno DMMS.R

Los datos fueron generados con el simulador DMMS.R distribuido por el grupo Épsilon [7]. El núcleo de esta herramienta computacional fue desarrollado por los trabajos en conjunto de la Universidad de Padova en Italia y la Universidad de Virginia en Estados Unidos de América [5-8]. El DMMS.R reproduce las dinámicas fisiológicas glucosa-insulina de pacientes virtuales adultos, adolescentes o niños DMT1. Además, pueden configurarse una gran diversidad de tratamientos de control glucémico que integren suministro de insulina, escenarios de alimentación y monitorización continua de glucosa en una interfaz de Matlab® y Simulink de MathWorks Inc. [9-12].

Construcción de la Base de Datos

Se simularon perfiles glucémicos correspondientes a 10 sujetos niños virtuales, junto con un perfil promedio, bajo 5 protocolos distintos de ingesta de carbohidratos a lo largo de un día. Las simulaciones incluyeron sólo la administración de insulina en bolos y consumo de comidas. Se excluyeron las configuraciones ejercicio físico para reducir la complejidad inicial. Se obtuvieron 72,000 datos de glucosa correspondientes a un día completo de 1440 minutos por paciente niño y por protocolo.

Las variables consideradas como predictores fueron: tiempo en minutos, carbohidratos totales, carbohidratos por periodo, insulina en bolo, insulina en el cuerpo y glucosa medida en mg/dL como variable objetivo. La Tabla 1 resume los protocolos alimentarios empleados, expresados en cinco horarios de simulación.

Tabla 1. Cantidad de imágenes obtenidas por fuente.

P	B-7	S-12	M-15	S-19	D-23
1	35	10	70	20	10
2	25	5	40	10	5
3	25	5	15	5	15
4	20	5	35	25	5
5	10	10	25	10	5

Fuente: Elaboración propia.

Diseño Computacional y Entrenamiento Del Modelo

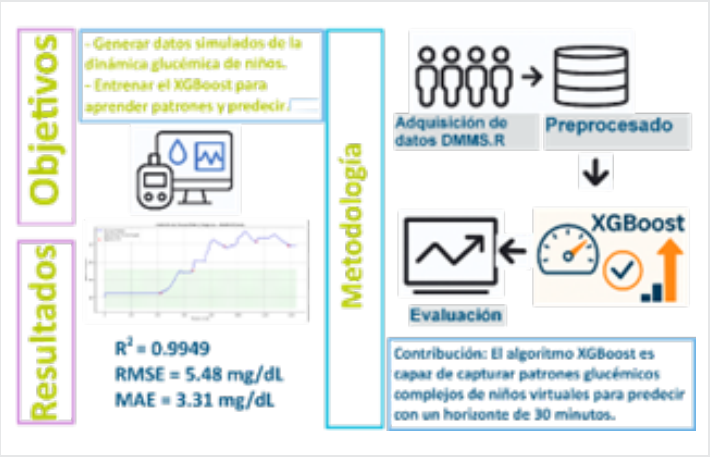


Figura 1. Diagrama general de la propuesta.
Fuente: Elaboración propia.

Los trabajos del presente manuscrito siguen un diseño experimental y computacional estructurado en las siguientes fases: simulación in silico, extracción de variables, preprocesamiento, partición del conjunto de datos para entrenamiento, validación y prueba, entrenamiento del modelo predictivo, evaluación con métricas estándar y visualización de resultados.

La Figura 1 resume de forma esquemática todas las etapas de este estudio. El modelo predictivo fue entrenado con el algoritmo XGBoost, dada su efectividad en problemas de regresión no lineal en contextos médicos [13-14]. La validación cruzada se utilizó para ajustar los hiperparámetros y reducir el riesgo de sobreajuste. El desarrollo se implementó en Python 3.10 con bibliotecas especializadas como XGboost, Pandas, Numpy, TensorFlow y Matplotlib.

Evaluación del modelo
La evaluación del modelo se basa en un enfoque de regresión supervisada. Se estimaron niveles de glucosa con un horizonte de 30 minutos, simulando condiciones de monitoreo en tiempo real. Las métricas utilizadas para la evaluación fueron: Error Absoluto Medio (MAE, del inglés: Mean Absolute Error), Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE, del inglés: Root Mean Square Error), Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE, del inglés: Mean Absolute Percentage Error) y Coeficiente de Determinación R2.

Se generaron curvas comparativas entre predicciones y datos simulados para diversos escenarios, destacando la capacidad del modelo para adaptarse a la variabilidad interpaciente. Uno de los análisis se enfocó en un día completo de simulación con cinco ingestas, evaluado en el paciente virtual Niño 4.

RESULTADOS
La evaluación del modelo se lleva a cabo empleando los datos en el entorno DMMS.R, específicamente sobre el paciente virtual Niño 4, bajo cinco protocolos distintos de ingesta de carbohidratos en 24 horas de simulación. Por su relevancia en la dinámica fisiológica se utilizan como variables de entrada: la glucosa proveniente del Monitor Continuo de Glucosa (MCG), la insulina suministrada de manera exógena y la ingesta de carbohidratos.

Para facilitar la interpretación visual de los resultados, este manuscrito presenta únicamente las dinámicas correspondientes al paciente Niño 4. Esta selección permite mostrar con mayor claridad la comparación entre los valores simulados y las predicciones generadas por el modelo XGBoost, evitando la superposición de curvas y la variabilidad interpaciente que dificultarían el análisis gráfico si se incluyeran los diez perfiles simulados.

Desempeño Del Modelo Sobre Datos Simulados
La Figura 2 ilustra la comparación entre los valores de glucosa simulados (línea azul continua) y los valores de predicción por el modelo XGBoost (línea verde continua). El eje horizontal representa el tiempo total de simulación en horas. Iniciando a las 0:00 horas y terminando después de 24 horas. Mientras que el eje vertical muestra la concentración de glucosa en volumen con unidades de mg/dL.

Figura 2: Comparación entre la glucosa simulada y la predicción por el modelo para Niño 4 bajo los 5 protocolos de ingesta.
Fuente: Elaboración propia en entorno Python.

Los indicadores de desempeño se presentan en la Tabla 2. Los resultados reflejan un ajuste altamente preciso, con un coeficiente de determinación R2 cercano a 1, lo que indica que el modelo explica prácticamente toda la variabilidad observada en los datos simulados. Tanto el MAE como el RMSE se mantuvieron en rangos bajos, confirmando la capacidad del algoritmo para reproducir el comportamiento glucémico minuto a minuto.

Tabla 2. Métricas de evaluación en entrenamiento de XGBoost.

RMSE	5.48 mg/dL
MAE	3.31 mg/dL
MAPE	43.2%
Coeficiente de determinación (R^2)	0.9949

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados demuestran que el modelo no sólo sigue las tendencias generales de la glucosa, sino que también captura con precisión los picos posprandiales y los descensos asociados a la acción de la insulina, reproduciendo la dinámica fisiológica descrita en la literatura [5-12].

Simulación De Un Día Con Cinco Ingestas

Con el fin de evaluar la aplicabilidad práctica del modelo XGBoost en un escenario representativo, se simula un día completo con cinco ingestas de carbohidratos. Estas ingestas son completamente diferentes a las que el modelo XGBoost tuvo en el entrenamiento y se distribuyen en los horarios descritos en la Tabla 3.

Tabla 3. Cantidad y horario de ingestas para un día de simulación en un escenario diferente al del entrenamiento.

Horario (hrs)	Cantidad de CHO (gramos)
07:00	15
11:00	38
15:00	25
19:00	8
23:00	32

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3 presenta la curva de predicción de glucosa para un día hacia el futuro en ventanas de 30 minutos usando el modelo XGBoost. Los puntos color rojo indican el horario y monto en donde se llevó a cabo la ingesta de carbohidratos. El área amarilla corresponde al rango normoglucémico (70–180 mg/dL). El área color azul corresponde a un nivel hipoglucémico (menor a 50 mg/dL). El área color rojo ligero es el área de hiperglucemia (mayor a 180 mg/dL). Después de cada ingesta, el modelo estimó aumentos transitorios en los niveles de glucosa, seguidos por descensos asociados al efecto de la insulina activa.

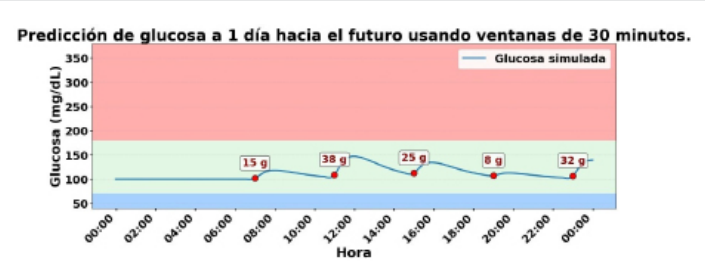


Figura 3: Predicción de glucosa a 1 día hacia el futuro usando ventanas de 30 minutos. Se consideran 5 ingestas con montos distintos a los del entrenamiento.
Fuente: Elaboración propia en entorno Python.

Se pueden identificar claramente que el modelo XGBoost captura la dinámica de los pacientes virtuales ya que en las ingestas de 38 gramos a las 11:00 horas y 32 gramos a las 23:00 horas en cuando el nivel de glucosa se eleva con mayor pendiente. De hecho, el máximo valor registrado es de 150 mg/dL aproximadamente a las 12:00 horas. No se observaron episodios de hipoglucemia, lo que indica que el modelo evitó predicciones que comprometan la seguridad fisiológica del paciente virtual.

Estos hallazgos refuerzan la utilidad del enfoque basado en XGBoost para anticipar alteraciones glucémicas bajo distintos patrones alimentarios, aportando evidencia de su potencial aplicación en herramientas de apoyo para la toma de decisiones clínicas en diabetes tipo 1.

CONCLUSIONES

El modelo desarrollado que integra simulación fisiológica con el algoritmo XGBoost, logró anticipar con alta precisión la dinámica glucémica minuto a minuto dentro de un día de predicción usando ventanas de 30 minutos en pacientes pediátricos virtuales con DMT1. Los resultados cuantitativos muestran un RMSE de 5.48 mg/dL, un MAE de 3.31 mg/dL y un coeficiente de determinación R2 de 0.9949. Esto demuestra que existe coherencia entre las predicciones y los datos extraídos de las simulaciones fisiológicas con el DMMS.R. Estos valores confirman la capacidad del modelo para reproducir tanto los periodos posprandiales como los descensos mediados por la insulina activa.

A pesar de su desempeño favorable, la naturaleza discreta de XGBoost limita la representación de la fluidez fisiológica de la glucosa. En este sentido, futuras investigaciones podrían incorporar técnicas de suavizado y modelos híbridos como LSTM o Transformers que permitan extender el horizonte de predicción y mejorar la capacidad del sistema frente a la variabilidad interpaciente e intrapaciente.

Este trabajo demuestra un interesante potencial del XGBoost para usarse como un complemento computacional para el personal de salud en la gestión de la DMT1. Sin embargo, las limitaciones de la presente propuesta radican en la aplicación en escenarios clínicos reales. Esto debido a que se necesitan diversas aprobaciones institucionales, de ética y cumplimiento de reglas clínicas. Además, los trabajos futuros deberían incluir nuevas variables fisiológicas que reflejen condiciones más cercanas a la realidad de los pacientes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, a través de la División de Estudios de Posgrado por el apoyo brindado para el desarrollo de este manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

[1] National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases (NIDDK), "¿Qué es la diabetes?," Abr. 2023. [Online]. Available:https://www.niddk.nih.gov/health-information/informacion-de-la-salud/diabetes/informacion-general/que-es.

[2] I. Ogrotis, T. Koufakis, and K. Kotsa, "Global Burden of Type 1 diabetes: Epidemiology and Public Health Challenges," Diabetes Therapy, vol. 14, no. 5, pp. 1007–1019, 2023. doi: https://doi.org/10.1007/s13300-023-01438-1.

[3] P. Xie and J. Xu, "Prediction of diabetes mellitus using XGBoost model," Applied and Computational Engineering, vol. 78, pp. 131–141, 2024. doi: https://doi.org/10.54254/2755-2721/78/20240646.

[4] K. Y. Ngiam and I. W. Khor, "Big data and machine learning algorithms for health-care delivery," The Lancet Oncology, vol. 20, no. 5, pp. e262–e273, 2019. doi: https://doi.org/10.1016/S1470-2045(19)30149-4.

[5] C. Dalla Man, R. A. Rizza, and C. Cobelli, "Meal simulation model of the glucose-insulin system," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 54, no. 10, pp. 1740–1749, 2007. doi: https://doi.org/10.1109/TBME.2007.893506.

[6] C. Dalla Man, M. Breton, and C. Cobelli, "Physical activity into the meal glucose–insulin model of type 1 diabetes: In silico studies," Journal of Diabetes Science and Technology, vol. 3, no. 1, pp. 56–67, 2009. doi: https://doi.org/10.1177/193229680900300107.

[7] The Epsilon Group, DMMS.R Diabetes Mellitus Metabolic Simulator, 2024. [Online]. Available: https://www.epsilonsim.com/dmmsr.

[8] B. P. Kovatchev, M. Breton, C. Dalla Man, and C. Cobelli, "In silico preclinical trials: A proof of concept in closed-loop control of type 1 diabetes," Journal of Diabetes Science and Technology, vol. 3, no. 1, pp. 44–55, 2009. doi: https://doi.org/10.1177/193229680900300106.

[9] C. Dalla Man, R. A. Rizza, and C. Cobelli, "The UVA/PADOVA Type 1 Diabetes Simulator: New features," Journal of Diabetes Science and Technology, vol. 8, no. 1, pp. 26–34, 2014. doi: https://doi.org/10.1177/1932296813514502.

[10] R. N. Bergman, C. Cobelli, and B. P. Kovatchev, "Quantitative models of insulin action and glucose metabolism," Annual Review of Physiology, vol. 83, pp. 55–78, 2021. doi: https://doi.org/10.1146/annurev-physiol-031820-092853.

[11] Ruiz-Velázquez, E., García-Rodríguez, J., Quiroz, G., and Femat, R. (2020). Robust ℵ-synthesis: Towards a unified glucose control in adults, adolescents and children with T1DM. Journal of the Franklin Institute, 357(14):9633-9653.

[12] Rios, Y. Y., García-Rodríguez, J., Sanchez, E. N., Alanis, A. Y., Ruiz-Velázquez, E., and Pardo Garcia, A. (2022). Treatment for T1DM patients by a neuro-fuzzy inverse optimal controller including multi-step prediction. ISA Transactions, 126:203-212.

Ciencias de la Computación

Ingeniantes

Detección del Virus de la Mancha Anular en la Papaya Mediante una Red Neuronal Convolucional

Colaboración
Cristian Armando Larios Bravo; Nydia Naomi Olmos Romero; Jesús Alberto Verduzco Ramírez; Luis Eduardo Morán López, Universidad de Colima

Fecha de recepción: 23 de noviembre 2025
Fecha de aceptación: 28 de septiembre de 2025

RESUMEN: México es uno de los principales productores de papaya en el mundo, posicionándose en el cuarto lugar en el ranking global. Este artículo explora el uso de redes neuronales convolucionales mediante el modelo pre-entrenado YOLOv11 para la detección del virus de la mancha anular en el cultivo de papaya (PRSV). El modelo fue entrenado con 2,880 imágenes que incluyen plantas infectadas y sanas, logrando una exactitud del 96.6%. Los resultados muestran una robusta capacidad de distinguir con eficacia entre ejemplares afectados por el virus y plantas saludables. Los modelos de aprendizaje profundo permiten procesar volúmenes significativos de datos de imágenes de forma rápida y realizar evaluaciones con un alto grado de exactitud, lo que optimiza la detección de plantas dañadas.

PALABRAS CLAVE: Aprendizaje Profundo, Cultivo de Papaya, Modelos Pre-entrenados, Redes Neuronales Convolucionales, Virus de la Mancha Anular, YOLO.

ABSTRACT: Mexico is one of the world's leading producers of papaya, ranking fourth globally. This article explores the use of convolutional neural networks through the pre-trained YOLO model to detect Papaya Ringspot Virus (PRSV) in papaya crops. The model was trained with 2,880 images of papaya plants infected with PRSV and healthy plants, achieving a high accuracy of 96.6%. The model is capable of distinguishing effectively between a plant that is infected with the virus from a healthy one. Deep learning models are capable of processing large volumes of image data quickly and performing evaluations with a high degree of accuracy, optimizing the detection of diseased plants.

KEYWORDS: Convolutional Neural Networks, Deep Learning, Papaya Crop, Papaya Ringspot Virus, Pre-trained models, YOLO.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de papaya es susceptible al padecimiento de una gran variedad de plagas y enfermedades de rápido de-

sarrollo. La temprana detección de dichas plagas y enfermedades traen consigo múltiples beneficios, entre los que se destaca la reducción de costos al ahorrar en plaguicidas, lo que, a su vez, contribuye a salvaguardar la salud de los consumidores reduciendo la presencia de los contaminantes derivados de estos productos [1], manteniendo el control de la enfermedad, evitando su propagación.

El papayo (Carica papaya L.) es una planta herbácea tropical nativa de México y Centroamérica [2]. México en particular es uno de los principales productores de papaya en el mundo, posicionándose en el cuarto lugar a nivel mundial [3].

El virus de la mancha anular en el cultivo de papaya (PRSV) ocupa el primer lugar a nivel mundial por su facilidad de transmisión, amplia distribución e importantes pérdidas de hasta el 100% en postcosecha y del 30% al 40% en cultivo [4].

Actualmente, no existe tratamiento químico capaz de eliminar el virus por completo, la única forma conocida para su control es retirando y quemando por completo el cultivo infectado, de esa forma se evita su propagación a los cultivos sanos [1].

El método más simple para la detección de plagas y enfermedades es a través de la detección visual de los síntomas de dichas afecciones, sin embargo, este método depende completamente de la experiencia del observador y es propensa a sesgos [5].

El desarrollo tecnológico ha conllevado una modernización de la agricultura [6]. La visión artificial más particularmente ha tenido un importante papel en la detección de plagas y enfermedades en múltiples cultivos, generando múltiples proyectos que han logrado una detección precisa.

En el trabajo de Hossen [7], se desarrolla un modelo de red neuronal convolucional con 30 épocas para la detección de cinco enfermedades en el cultivo de papaya, entre las que se encuentra el virus de la mancha anular. El trabajo se realizó con un total de 234 imágenes recolectadas de dataset públicas. Para evitar la distribución de las imágenes en 6 clases, se optó por hacer una clasificación binaria entre las plantas sanas y enfermas. Lograron obtener un 91% de precisión, concluyendo que su modelo posee la capacidad de diferenciar cultivos sanos de los enfermos.

Por su parte, Ajo Flores [8] decidió combinar técnicas moleculares (RT-PCR) con modelos de aprendizaje profundo. Para llevar a cabo el trabajo, se recolectaron imágenes multiespectral con un dron, para posteriormente hacer uso del modelo pre-entrenado YOLOv8 para la identificación de los cultivos de papayo, obteniendo una precisión del 91%. Una vez identificado el cultivo, se emplearon los resultados de las pruebas RT-PCR para identificar los cultivos que poseyeran el PRSV, obteniendo un 86% de precisión.

Ambos trabajos demuestran resultados positivos para la identificación de enfermedades en el cultivo de papaya, sin embargo, en ambos casos se observan áreas de oportunidad para mejora. En el caso del trabajo de Hossen [7], se plantea la ampliación del volúmen del conjunto de datos, ya que se considera que el volumen que obtuvieron es poco representativo y muy limitante. Además se plantea generar uno personalizado para el enfoque de este proyecto, para de esa forma evitar el uso de imágenes generadas por inteligencia artificial. Por parte del trabajo de Ajo Flores [8], se hará uso del mismo modelo pre-entrenado, economizando el proyecto, sustituyendo el uso de drones por teléfonos móviles, además de implementar el modelo directamente para la identificación del PRSV.

El proyecto surge de la necesidad existente de facilitar la detección temprana del PRSV en huertas de la región de Coahuayana, Michoacán. La rápida propagación de esta enfermedad en los cultivos locales ha ocasionado pérdidas económicas significativas, llegando incluso a contagiar la totalidad de cultivos productivos. Debido al nivel de impacto que tiene el PRSV en la producción y ganancias en el cultivo de papayo, el desarrollo de herramientas de bajo costo y métodos eficientes para su identificación oportuna se vuelve esencial. La implementación de herramientas accesibles y precisas podrían mitigar el impacto del virus, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y el desarrollo económico de la región.

Se plantea la hipótesis que un modelo pre-entrenado puede detectar exitosamente la enfermedad del virus de la mancha anular en cultivos de papaya con una exactitud comparable o superior a los métodos tradicionales.

El objetivo principal del presente trabajo es implementar y evaluar un modelo convolucional pre-entrenado para la detección del PRSV en hojas y frutos de la papaya, como base para el desarrollo de un aplicativo móvil de apoyo a agricultores locales. Esto con la intención de incrementar la economía local, y mejorar la salud alimentaria de la zona.

MATERIAL Y MÉTODOS

A través de una revisión sistemática de la literatura, se observa que numerosos estudios que implementan modelos de redes neuronales convolucionales y reportan resultados exitosos han adoptado la metodología CRISP-DM, mostrada en la Figura 1.

En consecuencia, este trabajo se basa en dicha metodología, la cual se estructura en las siguientes fases: comprensión del problema, comprensión de los datos –que abarca la adquisición y el etiquetado de las imágenes–, preparación de los datos –mediante técnicas de preprocesamiento de imágenes–, modelado, evaluación del modelo –utilizando métricas de rendimiento como precisión (accuracy)–, y despliegue del modelo.

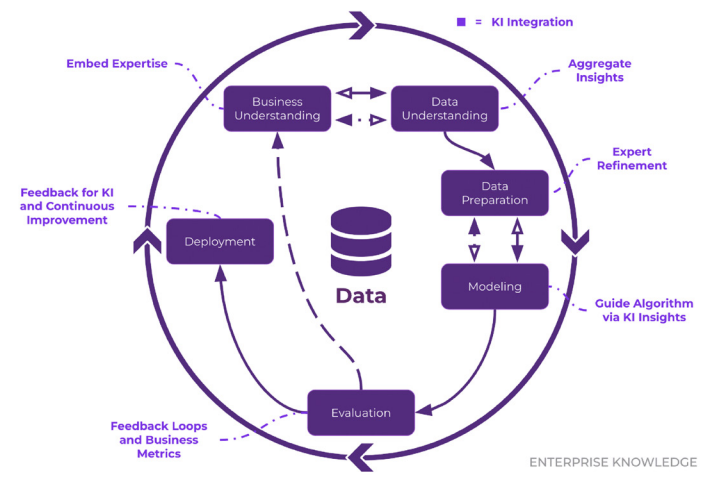


Figura 1. CRISP-DM.
Fuente: Recuperada de Kaleb Schultz [10].

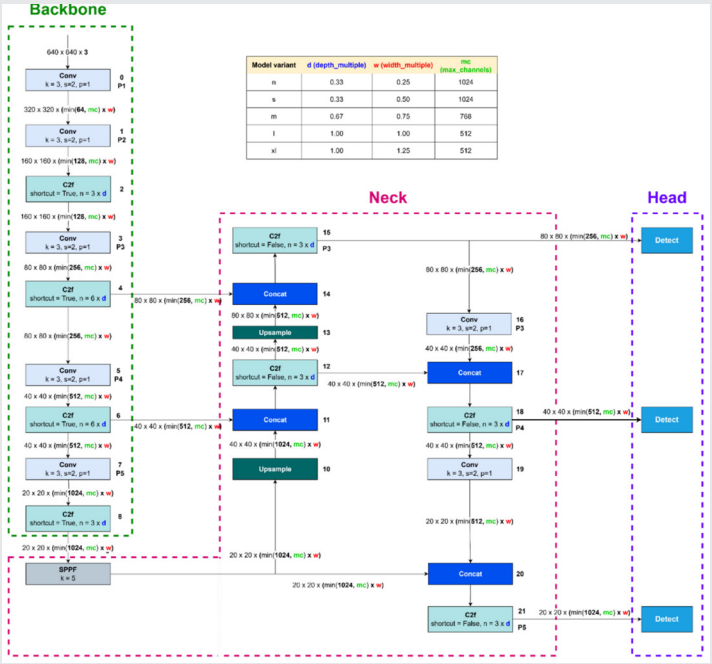


Figura 2. Arquitectura YOLOv11.
Fuente: Recuperada de Hidayatullah, Syakrani, Sholahuddin, Gelar, & Tubagus [12].

En este trabajo, se decidió utilizar el modelo pre-entrenado YOLO en su decimoprimera versión (YOLOv11), específicamente en su variante classify nano (yolo11n-cls.pt), debido a que, hasta el momento de la implementación, la decimosegunda versión (YOLOv12) aún no contaba con una versión estable para tareas de clasificación. De acuerdo con los resultados obtenidos por Madhu & Ravisankar [9], YOLOv5 demostró una superioridad en la detección de enfermedades en cultivos de algodón, superando a ResNet50 y VGG16. En el trabajo de Ajo Flores [8] YOLOv8 demostró un sólido desempeño en la detección de PRSV por lo que se considera un modelo óptimo para implementar. Ultralytics en su documentación en el momento de la elaboración de este trabajo comentaba que los recientes modelos YOLO ofrecen un mejor rendimiento de vanguardia (SOTA) en varias tareas, entre ellas la detección de objetos, la segmentación, la estimación de la pose, el seguimiento y la clasificación [11]. Pese a que la mayoría de las investigaciones que han implementado YOLO utilizan versiones anteriores, se cree que las mejoras que presenta la versión 11 se verán reflejadas en el entrenamiento y resultados, a su vez, este estudio se realiza con fines de investigación, buscando visualizar el rendimiento y precisión de decimoprimera versión en la tarea de clasificación e incentivar su uso para futuras investigaciones. En la Figura 2 se muestra la arquitectura implementada por YOLOv11.

El modelo YOLOv11 fue entrenado con un conjunto enriquecido de imágenes obtenidas directamente por los autores en condiciones reales de campo, lo que refuerza la aplicabilidad del modelo en escenarios reales de producción agrícola. En contraste con investigaciones previas, como la realizada por Hossen [7], donde se han desarrollado modelos de redes neuronales convolucionales para la clasificación de diversas enfermedades en los cultivos, este trabajo se enfoca exclusivamente en la detección del PRSV. Esta decisión responde a la alta tasa de pérdidas económicas que esta enfermedad genera en los cultivos de papaya, así como a su rápida propagación, lo que hace prioritaria la detección temprana y precisa para la implementación de de medidas de control eficaces.

Una de las principales diferencias metodológicas con respecto a estudios previos radica en el uso de fotografías capturadas directamente en huertas de cultivo de papaya, asegurando así que las condiciones de iluminación, ángulos de cámara y calidad de imagen sean representativas del entorno en el que los agricultores implementarían el modelo. Este enfoque busca mejorar la capacidad del modelo para generalizar su aprendizaje y ofrecer un desempeño robusto en situaciones reales de campo. La hoja y el fruto fueron los objetos de interés para estos modelos de clasificación.

Adquisición y etiquetado de imágenes

Se recopiló un conjunto de 1200 imágenes utilizando tres cámaras de teléfonos celulares inteligentes, de las cuales 600 corresponden a hojas y frutos de cultivos de papayo afectados por el PRSV y 600 a muestras de hojas y frutos en estado saludable. En las figuras 3 y 4 se muestran ejemplos de fotos tomadas. La selección de teléfonos celulares inteligentes como dispositivos de captura se basó en la aplicabilidad del modelo de entornos agrícolas reales, ya que su implementación está orientada a facilitar la detección de la enfermedad directamente en campo mediante imágenes tomadas con estos dispositivos, además de las limitaciones económicas con las que se realizó el presente trabajo. El conjunto de imágenes de plantas de papayo utilizado en este trabajo fue recolectado manualmente de diversas huertas ubicadas en la región de Coahuayana, Michoacán. Las imágenes estaban distribuidas en dos categorías distintas, todas a color y en tres tamaños diferentes: 2600x4624, 960x1280 y 1836x4080 píxeles, en formato JPG.

El proceso de recolección de imágenes se llevó a cabo a lo largo de un semestre en huertas de tamaño moderado, asegurando la obtención de un conjunto de datos representativo de la variabilidad fenotípica del papayo en distintas condiciones ambientales y de desarrollo. Para garantizar una correcta clasificación de las imágenes, se empleó la plataforma Roboflow, la cual permitió realizar el etiquetado preciso de las muestras, separándolas en categorías según su estado fitosanitario, la división del dataset fue aleatoria dando lugar a 840 imágenes en entrenamiento, 240 en validación y 120 en prueba, siguiendo las recomendaciones de la plataforma.

Figura 3 y 4. Ejemplares de papayo sano y papayo con presencia del PRSV Anular en el Papayo.
Fuente: Elaboración propia.

Preprocesamiento de imágenes

Se llevó a cabo un preprocesamiento de las imágenes con el objetivo de optimizar su calidad y adaptarlas a los requerimientos del modelo de aprendizaje profundo. Este proceso incluyó la aplicación de técnicas de aumento de datos aplicada al conjunto de datos de entrenamiento, con ayuda de la plataforma Roboflow, para incrementar la diversidad del conjunto de entrenamiento y mejorar la capacidad de generalización del modelo. Entre las técnicas utilizadas se encuentran la inversión horizontal (espejado), rotación con distintos ángulos y ajustes en los niveles de brillo, lo que permitió simular variaciones en las condiciones de captura y mitigar posibles sesgos en el entrenamiento. En la Figura 5 se muestran las configuraciones empleadas en Roboflow.

Adicionalmente, todas las imágenes fueron redimensionadas a una resolución de 640 x 640 píxeles, asegurando uniformidad en el conjunto de datos y optimizando la eficiencia computacional durante la fase de entrenamiento del modelo. Como resultado de este proceso de aumento y estandarización, se generó un conjunto de entrenamiento con 2,520 imágenes, lo que representa un incremento de 1,680 imágenes. Para evitar el sesgo del modelo no se incluyeron imágenes con aumentación de datos en el conjunto de validación y pruebas.

Esta distribución del conjunto de datos sigue las mejores prácticas en el desarrollo de modelos de aprendizaje profundo, asegurando una evaluación rigurosa y representativa del desempeño del modelo en la detección del PRSV en el papayo.

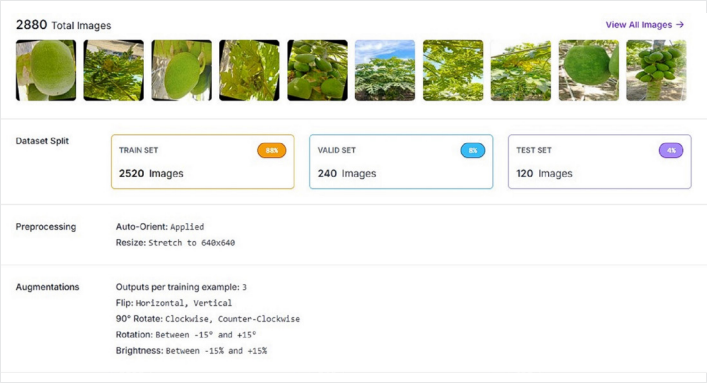


Figura 5. Etiquetado, aumento de datos y división de dataset con Roboflow.
Fuente: Elaboración propia.

Hardware y Software utilizado

El proceso de entrenamiento, validación y prueba del modelo se llevó a cabo en un equipo de cómputo con las especificaciones detalladas en la Tabla 1. Asimismo, la recopilación de imágenes se realizó utilizando teléfonos celulares inteligentes cuyas características también se muestran en dicha tabla. La información es relevante para comprender las condiciones de captura de imágenes y los recursos computacionales utilizados en el desarrollo del modelo.

Tabla 1. Características de hardware del equipo de desarrollo.

Equipo	Elemento	Capacidad
Laptop	Memoria RAM	16 GB
	Disco Duro	480 GB
	Procesador	AMD Ryzen 5 5500U @2.10GHz
	Sistema Operativo	Windows
Teléfono Celular Inteligente 1	Memoria RAM	12 GB
	Disco Duro	512 GB
	Procesador	Snapdragon 8+ Gen 1 Mobile Plarform Octa-core Max 3.0GHz
	Cámara	64 MP
	Sistema Operativo	Android
Teléfono Celular Inteligente 2	Memoria RAM	4 GB
	Disco Duro	128 GB
	Procesador	Snapdragon 680 Octa-core Max 2.40GHz
	Cámara	50 MP
	Sistema Operativo	Android
Teléfono Celular Inteligente 3	Memoria RAM	6 GB
	Disco Duro	256 GB
	Procesador	Apple A16 Bionic
	Cámara	48 MP
	Sistema Operativo	iOS

Fuente: Elaboración propia.

Se utilizó Roboflow para automatizar varias etapas del procesamiento de imágenes, optimizando la preparación del dataset para su posterior uso en el modelo de aprendizaje profundo.

Para la implementación del modelo y el preprocesamiento del conjunto de datos, se eligió el lenguaje de programación Python debido a su amplia compatibilidad con bibliotecas especializadas en aprendizaje automático y visión por computadora, como Tensorflow, Keras, PyTorch y OpenCV. La versatilidad de Python, junto con su extensa comunidad de desarrollo, permitió la integración eficiente de diversas herramientas para el preprocesamiento, entrenamiento y evaluación del modelo. La Figura 6 muestra la línea de código en Python empleada para el entrenamiento del modelo.

```
!yolo task=classify mode=train model=yolo11n-cls.pt data='dataset_papaya' epochs=35 imgsz=640
```

Figura 6. Proceso de entrenamiento del modelo YOLO11n-cls.pt en Python.
Fuente: Elaboración propia.

Dado que el procesamiento y entrenamiento del modelo requiere un alto poder computacional y considerando las limitaciones de hardware locales, se optó por utilizar Google Colaboratory como entorno de desarrollo en la nube. Google Colaboratory proporciona acceso gratuito a recursos computacionales avanzados, incluyendo unidades de procesamiento gráfico (GPU), lo que permite acelerar significativamente el entrenamiento del modelo. Además, su integración con Google Drive facilita el almacenamiento y la gestión de los datos sin la necesidad de infraestructura local adicional. La Tabla 2 se observan las características de la máquina virtual proporcionada por Google Colaboratory en su versión gratuita, el uso de esta infraestructura en la nube permite entrenar el modelo de manera eficiente sin requerir equipos locales de alto rendimiento, garantizando así un proceso de experimentación ágil y escalable.

Tabla 2. Características de la máquina virtual de Google Colaboratory utilizada.

Recurso	Especificación
Sistema Operativo	Ubuntu 20.04 LTS
Unidad de Procesamiento Central (CPU)	Intel Xeon (2 núcleos, ~2.3GHz)
Memoria RAM	12.7 GB
Unidad de Procesamiento Gráfico	NVIDIA Tesla T4
Memoria de la GPU	15 GB
Almacenamiento en Disco	112.6 GB de almacenamiento temporal
Entorno de Desarrollo	Python 3.8+, Jupyter Notebook integrado
Conectividad	Soporte para bibliotecas en la nube y acceso a Google Drive

Fuente: Elaboración propia.

Configuración del modelo YOLO11n-cls.pt

Los hiperparámetros utilizados en el modelo YOLOv11, detallados en la Tabla 3, se basaron principalmente en las configuraciones predeterminadas del framework Ultralytics. Entre las adaptaciones implementadas se destaca el ajuste del número de épocas para equilibrar la convergencia del modelo y evitar el sobreajuste, la selección de la arquitectura YOLOv11n-cls.pt optimizada para clasificación, y la integración de un conjunto de datos especializado compuesto por imágenes de papaya en dos estados: asintomático e infectado por el PRSV. Esta configuración garantizó la reproducibilidad del experimento y se alineó con los estándares metodológicos empleados en visión artificial para el diagnóstico de enfermedades vegetales. Dada la limitación de los recursos computacionales, se optó por hacer uso de 35 épocas por el tiempo de ejecución que tarda en entrenarse el modelo, el cual fue de 1.277 horas.

Tabla 3. Hipeparámetros utilizados en el modelo YOLO11n-cls.pt.

Hiperparámetro	Valor
Task	Classify
Mode	Train
Epochs	35
Batch size	16
Model	Yolo11n-cls.pt
Imgsize	640x640
Momentum	0.937
Optimizer	Adam
Learning rate	0.01

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Conjunto de datos de entrenamiento y validación

Como se ilustra en las figuras 7, 8 y 9, el análisis de las curvas de entrenamiento y validación evidencia un comportamiento coherente del modelo YOLOv11 en la tarea de clasificación fisiopatológica. La curva de pérdida en entrenamiento exhibió una reducción monotónica desde un valor inicial de 0.4 hasta alcanzar una convergencia cercana a 0 (0.0) al finalizar las 30 épocas, reflejando una optimización efectiva de los parámetros del modelo.

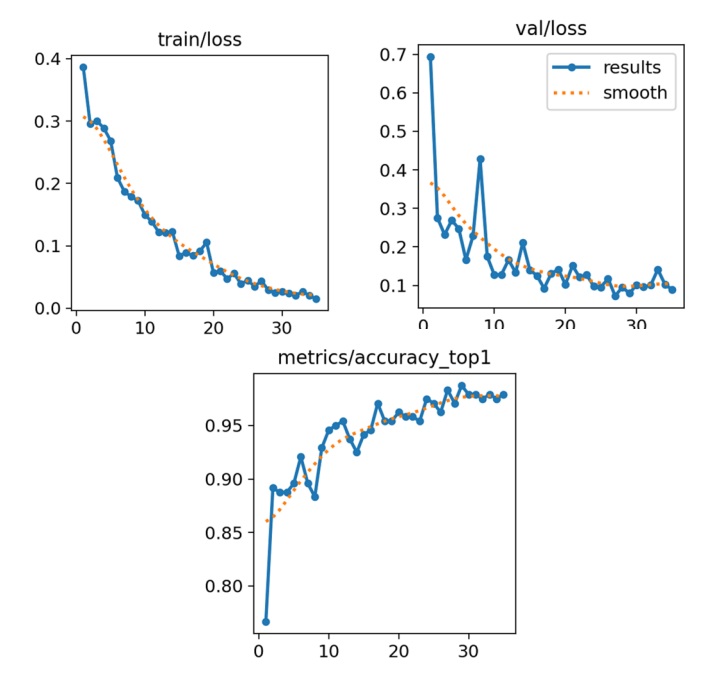


Figura 7, 8 y 9. Pérdida y Accuracy en las fases de Entrenamiento y Validación del modelo YOLOv11.
Fuente: Elaboración propia.

En contraste, la curva de pérdida en validación descendió de 0.7 a 0.1 durante el mismo período, manteniendo una trayectoria paralela sin divergencias significativas, lo que sugiere una capacidad de generalización robusta ante datos no observados durante el entrenamiento. Complementariamente la exactitud como métrica de evaluación, demostró un incremento progresivo desde un 80% hasta estabilizarse arriba del 95% corroborando la eficacia de la configuración de hiperparametros implementada (resolución espacial de 640 x 640 píxeles, arquitectura YOLO11n-cls.pt). Si bien estos resultados indican un aprendizaje exitoso, la proximidad de la pérdida de entrenamiento a valores mínimos absolutos justifica una evaluación rigurosa de sobreajuste mediante un conjunto de pruebas independiente.

Métricas de evaluación

Las métricas de evaluación implementadas son las siguientes: exactitud Ec.1, precisión Ec.2, sensibilidad Ec.3, especificidad Ec.4, y el F1 score Ec.5. Todas las métricas se basan en la matriz de confusión [13].

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + FN + TN + FP} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$Prc = \frac{TP}{TP + FP} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$Sns = \frac{TP}{TP + FN} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$\boldsymbol{Spc = \frac{TN}{TN + FP}} \quad \text{Ec. (4)}$$

$$\boldsymbol{F1\ score = 2\frac{Prc * Sns}{Prc + Sns}} \quad \text{Ec. (5)}$$

Conjunto de datos de pruebas

El modelo demostró una capacidad predictiva robusta en la identificación del PRSV en tejidos de la papaya, alcanzando una sensibilidad del 100% (64/64 muestras infectadas correctamente clasificadas) en condiciones que el modelo nunca había visto en su etapa de entrenamiento y validación. No obstante, en la detección del tejido sano, se registró una especificidad del 92.68% (52/56 muestras asintomáticas identificadas con éxito), lo que sugiere la presencia de falsos positivos en un 7.14% de los casos.

Finalmente, se obtuvo un 96.6% de exactitud y una precisión del 94.12%. El F1 score obtenido fue del 96.96%, demostrando la fortaleza que posee el modelo en la identificación del PRSV.

CONCLUSIONES

Con base en la exactitud (accuracy) del 96.6% obtenida en pruebas por el modelo YOLOv11, entrenado con un conjunto de datos de 2,880 imágenes durante 35 épocas, se concluye que es capaz de identificar con eficacia la presencia del PRSV en la papaya tanto en los frutos como en las hojas de la

planta. Además, la adecuada configuración de los hiperparámetros del modelo permitió reducir el costo computacional y prevenir problemas como el sobreajuste.

En comparación con el trabajo de Ajo Flores [8] el modelo entrenado en el presente trabajo superó en exactitud la solución propuesta por el autor en un 10.68%. Por su parte, el modelo superó al modelo entrenado por Hossen [7] en un 5.6% de exactitud, lo cual se le atribuye a que en este trabajo se contó con un dataset amplio y dedicado para la problemática presentada.

El presente trabajo es un aporte relevante a la agricultura local en el control del PRSV a través de herramientas modernas, ya que, pese a ser un virus con mucho impacto en el cultivo de papaya, no es un tema ampliamente abordado. Gracias a este trabajo se ha logrado identificar y clasificar ejemplares dañados por el PRSV con el fin de detectar y erradicar esta amenaza en cualquier etapa del cultivo, además el tiempo del proceso de revisión de las plantas que realizan los agricultores se podría ver minimizado.

A pesar del buen desempeño alcanzado, el modelo presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas, entre ellas la posibilidad de probar el modelo en ambientes con diferencias drásticas, puesto que las condiciones de los huertos son similares, lo que puede causar resultados erróneos. A su vez, se presenta la necesidad de validar el modelo con diferentes ciclos de crecimiento y calidades de imágenes.

Como trabajo a futuro, se plantea la implementación del modelo generado en este trabajo en un aplicativo móvil que permita su uso en campo, y de esa manera, ser una herramienta de apoyo para los agricultores locales.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a los propietarios de las huertas, los cuales nos permitieron tomar fotografías a sus cultivos. En especial, al agricultor que nos guió en cada una de las visitas al campo, además de brindarnos más detalles e información respecto a la identificación y tratamiento del PRSV. Sin ellos no hubiese sido posible la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Gobierno del Estado de Colima. (2015). Guía Para El Control De Plagas Y Enfermedades En El Cultivo Del Papayo, En El Estado De Colima. Colima, México.

[2] Bermúdez Guzmán, M. de J., Guzmán González, S., Lara Reyna, J., Palmeros Suárez, P. A., López Muraira, I. G., y Gómez Leyva, J. F. (2018). Presencia de Papaya ringspot virus (PRSV) en arvenses asociadas a Carica papaya en Colima, México. Revista mexicana de fitopatología, 36(1).

[3] Burns, P., Saengmanee, P., y Doung-Ngern, U. (2022). Papaya: The Versatile Tropical Fruit. En Tropical Plant Species and Technological Interventions for Improvement (pp. 1–14). IntechOpen.

[4] Valderrama Alfaro, S. M., y Sedano Saavedra, C. (2013). Caracterización Sintomatológica Y Determinación De Virus Que Infectan Al Cultivo De Carica Papaya L., En Algunas Zonas Del Norte Del Perú [Tesis de maestría]. Universidad Nacional De Trujillo, Perú.

[5] Venbrux, M., Crauwels, S., y Rediers, H. (2023). Current and emerging trends in techniques for plant pathogen detection. Frontiers in Plant Science, 14.

[6] Carrillo Riofrío, F. M., Segovia Cáceres, S. M., y Jijon Paredes, E. M. (2021). La Innovación en la Agricultura Digital. Dominio de las ciencias, 7(3), 1652–1658.

[7] Hossen, S., Haque, I., Islam, S., Ahmed, T., Nime, J., y Islam, A. (2020). Deep learning based classification of papaya disease recognition. En Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems (pp. 945–951). Thoothukudi, India: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

[8] Ajo Flores, R. E., Eras Zamora, E. A., y García Baño, X. P. (2023). Detección temprana de Papaya ringspot virus (PRSV) en cultivos de papaya (Carica papaya) usando imágenes multiespectrales y aprendizaje profundo relacionado con técnicas moleculares [Proyecto integrador]. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. Recuperado de https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/58408

[9] Madhu, S., y Ravisankar, V. (2025). Comprehensive Analysis of a YOLO-based Deep Learning Model for Cotton Plant Leaf Disease Detection. Engineering, Technology and Applied Science Research, 15(1), 19947–19952.

[10] Kaleb Schultz (2025). Understanding the Role of Knowledge Intelligence in the CRISP-DM Framework: A Guide for Data Science Projects. Obtenida el 11 junio de 2025, de la página electrónica https://enterprise-knowledge.com/understanding-the-role-of-knowledge-intelligence-in-the-crisp-dm-framework-a-guide-for-data-science-projects/.

[11] Ultralytics. (2025). YOLO: Breve historia. Recuperado el 11 de junio de 2025, de https://docs.ultralytics.com/es/#yolo-a-brief-history.

*[12] Hidayatullah, P., Syakrani, N., Sholahuddin, M. R., Gelar, T., y Tubagus, R. (2025). *YOLOv8 to YOLO11: A Comprehensive Architecture In-depth Comparative Review*. arXiv preprint arXiv:2501.13400. Recuperado de https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.13400.*

[13] Google (2025). "Google Colaboratory,". Recuperado el 05 de septiembre de 2025 de https://colab.google/.

[14] J. R. Macas Bermeo, "Desarrollo De Una Aplicación Para La Detección De Plagas En El Cultivo De Papas Aplicando Redes Neuronales Convolucionales," Tesis de grado, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador, 2022, pp. 45.

Ciencias de la Computación

Ingeniantes

Identificación de plagas y cultivos enfermos con aplicación de Inteligencia Artificial usando YOLOv5

Colaboración
Edilberto Vega Lopez; María Guadalupe Pineda Arizmendi, Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco; Irvin Uriel Nopalera Ángeles, Universidad Autónoma del Estado de México; Brenda Sunuami González Lopez, Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco

Fecha de recepción: 17 de agosto de 2025
Fecha de aceptación: 13 de septiembre de 2025

Resumen: Según la OMS, cada año en el mundo más de 500 millones de personas se enferman por consumir alimentos contaminados por diversos factores, incluidas las plagas. Actualmente, en el Estado de México se cosechan más de 738,069.06 hectáreas con un valor de producción de 33,699.37 millones de pesos, lo que representa un gran desafío para garantizar la producción de estos cultivos ante la presencia de plagas.
El proyecto de investigación se enfoca en la detección de plagas como: insecto, saltamontes, gusano cogollero y escarabajo, así como la clasificación de fruto enfermo y fruto sano en cultivos cercanos referente a la comunidad de Santiago Tianguistenco, comenzando con la construcción de un conjunto de datos propio, recopilando imágenes y experimentando con una red neuronal para la detección de plagas.

Para las pruebas realizadas en esta investigación, se utilizó información etiquetada mediante la herramienta pública Roboflow, así como un modelo de red neuronal convolucional basado en Yolov5, sometido a 50 épocas de entrenamiento en un entorno de Google Colab, obteniendo una precisión del 95.7%.

PALABRAS CLAVE: Plaga, Red neuronal, Yolov5.

Abstract : According to the World Health Organization (WHO), each year more than 500 million people worldwide become ill from consuming food contaminated by various factors, including pests. Currently, in the State of Mexico, over 738,069.06 hectares are harvested with a production value of 33,699.37 million pesos, which presents a major challenge in ensuring crop production in the presence of pests.

The research project focuses on the detection of pests such as insects, grasshoppers, fall armyworms, and beetles, as well as the classification of diseased and healthy fruit in nearby crops related to the community of Santiago Tianguistenco. The project begins with the construction of a proprietary dataset, collecting images and experimenting with a neural network for pest detection.

For the tests conducted in this research, labeled data was used through the public tool Roboflow, along with a convolutional neural network model based on YOLOv5, trained over 50 epochs in a Google Colab environment, achieving an presision of 95.7%.

KEYWORDS: Plague, Neural Network, Yolov5.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la agricultura enfrenta numerosos desafíos para maximizar su rendimiento, entre ellos tratamientos inadecuados del suelo, infestaciones de enfermedades y plagas, entre otros. Debido al aumento continuo de la población humana, se estima que la demanda de producción de alimentos deberá incrementarse entre un 70 % y un 100 % en los próximos años. Sin embargo, la seguridad alimentaria de la humanidad se ve afectada por diversos factores, incluidas las plagas [1].

Una plaga es cualquier especie, raza o biotipo de planta, animal o patógeno que resulte perjudicial para las plantas o sus productos [2].

Un cultivo es cualquier planta que se cultiva intencionalmente para ser cosechada con fines alimenticios, forrajeros, de fibra, combustible u otros propósitos económicos [2].

Las enfermedades y plagas vegetales representan una amenaza constante para la disponibilidad y seguridad de los cultivos destinados al consumo humano y animal. Las pérdidas globales de rendimiento en cultivos básicos pueden alcanzar hasta un 30 %, lo que equivale a cientos de miles de millones de dólares en producción alimentaria perdida [3].

El Estado de México cuenta con 738,069.06 hectáreas cosechadas, con un valor de producción de 33,699.37 millones de pesos. Esto representa un reto importante para garantizar el éxito de los cultivos y protegerlos ante la presencia de plagas [4].

La Inteligencia Artificial (IA) es la capacidad de las máquinas para utilizar algoritmos, aprender a partir de datos y aplicar lo aprendido en la toma de decisiones, de forma similar a como lo haría un ser humano [5].

El uso de la inteligencia artificial y las nuevas tecnologías ha permitido proteger los cultivos al mejorar su rendimiento frente a diversos factores, como el cambio climático, el crecimiento poblacional y la seguridad alimentaria. Además, ofrece beneficios en el uso adecuado del agua, pesticidas y herbicidas, lo que contribuye a una mayor eficiencia laboral. Todo esto impulsa la productividad, mejora la calidad y ayuda a mantener la fertilidad del suelo [6].

Este proyecto de investigación se enfocará en la detección de plagas en cultivos cercanos a la comunidad de Santiago Tianguistenco, comenzando por la construcción de un conjunto de datos propio hasta la experimentación con una red neuronal para la detección de plagas.

El objetivo de este trabajo es desarrollar y evaluar un sistema automatizado de detección de plagas y enfermedades mediante redes neuronales convolucionales, con captura de imágenes, orientado a cultivos localizados en el Estado de México

Revisión de la literatura

Existen diversos estudios relacionados con la detección de plagas mediante técnicas de inteligencia artificial. Algunos de los trabajos mencionados a continuación están estrechamente relacionados con el enfoque de esta investigación.

SM Samadhi y otros [7].

Realizaron la detección de plagas en cultivos de arroz utilizando un dispositivo ESP32 montado sobre un trípode de 1.5 metros para recolectar su propio conjunto de datos, incluyendo babosas, caracoles, polillas, avispas, tijeretas, orugas y gorgojos. Desarrollaron un modelo de aprendizaje automático para identificar diversas plagas en campo, empleando el método YOLOv8 y entrenándolo durante 100 épocas. Lograron una precisión superior al 90 %, identificando exitosamente las plagas.

Li y otros [8].

Crearon su propio conjunto de datos con imágenes capturadas mediante una cámara Canon Powershot G16 y un teléfono Samsung Galaxy S10, tomadas desde distintos ángulos y distancias (0.3–0.5 m). En total, recopilaron 4,418 imágenes de diversas clases de plagas y enfermedades del yute, como pudrición del tallo, antracnosis y banda negra, entre otras. Estas imágenes fueron utilizadas para entrenar su modelo personalizado, YOLO-JD, basado en YOLOv5, alcanzando una precisión promedio del 96.63 %.

Wen, C y otros [9].

Propusieron un modelo llamado Pest-YOLO, basado en YOLOv3, utilizando un conjunto de datos de imágenes de plagas a gran escala denominado Pest24, que incluye más de 20,000 imágenes con más de 190,000 plagas etiquetadas por expertos agrícolas y categorizadas en 24 clases. Los resultados experimentales muestran que Pest-YOLO alcanzó una precisión del 69.59 %.

Liu et y otros [10].

Propusieron un método basado en YOLOv3, utilizando detección multiescala mediante una pirámide de imágenes, agrupamiento de dimensiones de cuadros delimitadores (bounding boxes) y entrenamiento multiescala. Este método alcanzó una precisión del 92.39 %.

Cabrera [11]

Utilizó un modelo YOLOv3 entrenado durante 200 épocas con su propio conjunto de datos, compuesto por 80 imágenes de mosca blanca y trips. Logró una precisión promedio del 71.42 %.

MATERIAL Y MÉTODOS

Este trabajo propone la identificación de plagas en cultivos cercanos a la comunidad de Santiago Tianguistenco mediante el uso de una red neuronal convolucional basada en YOLOv5, con el fin de optimizar la detección de plagas.

YOLOv5 es la primera versión de código abierto desarrollada por la empresa Ultralytics para la detección de objetos en tiempo real. Esta arquitectura de red neuronal convolucional está basada en el trabajo de Redmon y Farhadi [12].

El desarrollo de este trabajo se basó en la metodología CRISP-DM, la cual consta de seis fases.
De acuerdo con la Figura 1, los pasos a seguir son los siguientes:
1. Desarrollar una red neuronal convolucional basada en YOLOv5 para detectar plagas y cultivos enfermos cerca de la comunidad de Santiago Tianguistenco.
2. Utilizar conjuntos de datos existentes sobre plagas y cultivos enfermos, así como recolectar imágenes personalizadas para crear conjuntos de datos propios.
3. Utilizar la plataforma Roboflow para el etiquetado de datos en formato YOLOv5.
4. Implementar la red neuronal convolucional basada en YOLOv5 en un entorno de Google Colab, utilizando Python como lenguaje de programación.
5. Comparar el rendimiento del modelo con el estado del arte y evaluarlo mediante métricas de rendimiento como precisión, recall y mAP@50.
6. Realizar pruebas con diferentes conjuntos de datos.

El trabajo de Ryan [13] implementa un sistema basado en la red neuronal convolucional YOLOv8 para clasificar arándanos según su madurez. Usaron 666 imágenes de arándanos en tres etapas de maduración: verde, en transición y maduros, utilizando la plataforma Roboflow para el etiquetado de datos y optimizando técnicas de aumento como rotación, ajuste de brillo y cambio de contraste para aumentar la variabilidad y robustez del conjunto de datos.

Roboflow simplifica y optimiza los procesos de etiquetado, aumento y exportación de datos, por lo que es una herramienta ideal para proyectos de detección de objetos, como aquellos que utilizan YOLO.

Por lo tanto, todas las imágenes fueron etiquetadas usando la herramienta Roboflow en formato YOLOv5, el cual es el siguiente: **class id x_center y_center width height**
Donde:
• **class id:** Identificador de la clase del objeto (un número entero que empieza desde 0 para la primera clase).
• **x_center:** Coordenada X del centro del cuadro delimitador, normalizada entre 0 y 1, relativa al ancho de la imagen.
• **y_center:** Coordenada Y del centro del cuadro delimitador, normalizada entre 0 y 1, relativa a la altura de la imagen.
• **width:** Ancho del cuadro delimitador, normalizado entre 0 y 1, relativo al ancho de la imagen.
• **height:** Altura del cuadro delimitador, normalizada entre 0 y 1, relativa a la altura de la imagen.

En la Figura 2 se puede observar un etiquetado de caja delimitadora en Roboflow, que proporcionará las etiquetas necesarias en formato YOLOv5.

Una vez etiquetadas todas las imágenes, se descargará el conjunto de datos, el cual contendrá lo siguiente, como se muestra en la Figura 3. Una carpeta para entrenamiento y otra para pruebas, que contienen respectivamente las imágenes y las etiquetas.
Además, el archivo de datos indica el orden en que deben organizarse las clases.

Conjuntos de Datos Utilizados
• IP102: Es un conjunto de datos público y uno de los más utilizados en la investigación sobre detección de plagas agrícolas. Fue diseñado para abordar problemas de clasificación y detección de plagas en cultivos, y contiene una gran variedad de imágenes de insectos plaga recolectadas en entornos reales.
• Tejocote: Construido usando un dron DJI Mavic Mini. El árbol se ubicaba cerca de la institución, y el dron voló a una altura de 7 a 10 metros, capturando fotos a una resolución de 1080p y a una distancia de 15 a 30 cm.
• Maíz: Proporcionado por un colaborador, contiene las principales plagas del maíz, así como hojas sanas y enfermas de la planta.

Los conjuntos de datos pueden ser accedidos en:
https://github.com/edyvel67/Plagas-.git
para su uso por parte de la comunidad científica.

Red Neuronal
Las redes neuronales artificiales están basadas en la analogía con el comportamiento y la función del cerebro humano, particularmente del sistema nervioso, compuesto por redes de neuronas biológicas con capacidades de procesamiento limitadas. Sin embargo, toda su capacidad cognitiva se basa en la conectividad de estas neuronas [14].

YOLOv5
YOLOv5 es un modelo muy popular y de alto rendimiento en el campo de la detección de objetos, reconocido como tecnología de vanguardia para detecciones en tiempo real (FPS). Representa la quinta generación de detectores de una sola etapa y está implementado en PyTorch [15].

Arquitectura de YOLOv5
• **Backbone:** Utiliza la estructura CSP-Darknet53, una modificación de la arquitectura DarkNet usada en versiones anteriores, y actúa como extractor de características.
• **Neck:** Conecta el backbone con el head. En YOLOv5 se utilizan las estructuras SPPF y CSP-PAN.
• **Head:** Se encarga de generar la inferencia. YOLOv5 utiliza el mismo head que YOLOv3.

Dron
El dron es un dispositivo de navegación autónoma con características técnicas específicas, diseñado para realizar una amplia variedad de tareas. Puede utilizarse tanto en exteriores como en algunos espacios interiores. Se le pueden integrar distintos tipos de sensores ópticos, como cámaras de video, cámaras de espectro visible, cámaras infrarrojas, entre otros. Además, pueden incorporarse otros tipos de sensores. Los drones pueden operar a diversas altitudes mediante vuelos completamente automáticos, preprogramados, controlados remotamente o manejados manualmente con un sistema de radio control [16].

Características del Dron Utilizado (DJI Mavic Mini 1)

• Diseño y Portabilidad:

Peso: 249 gramos (cumple con regulaciones que lo exentan de registro en varios países).

Dimensiones:

- Plegado: 140 × 82 × 57 mm
- Desplegado: 160 × 202 × 55 mm

• Cámara y Video:

Sensor: 12 MP, CMOS de 1/2.3"

Resolución de fotos: 4000 × 3000 píxeles

Full HD: 1920 × 1080 a 60 fps

Ángulo de visión (FOV): 83°

Apertura: f/2.8

• Alcance y Conectividad:

Alcance de control: Hasta 4 km (en zonas sin interferencia, con FCC)

Conectividad: Wi-Fi

Google Colab

Google Colaboratory (también conocido como Colab) es un servicio basado en la nube que utiliza Jupyter Notebooks para promover la educación e investigación en aprendizaje automático. Proporciona un entorno completamente configurado para el aprendizaje profundo [17].

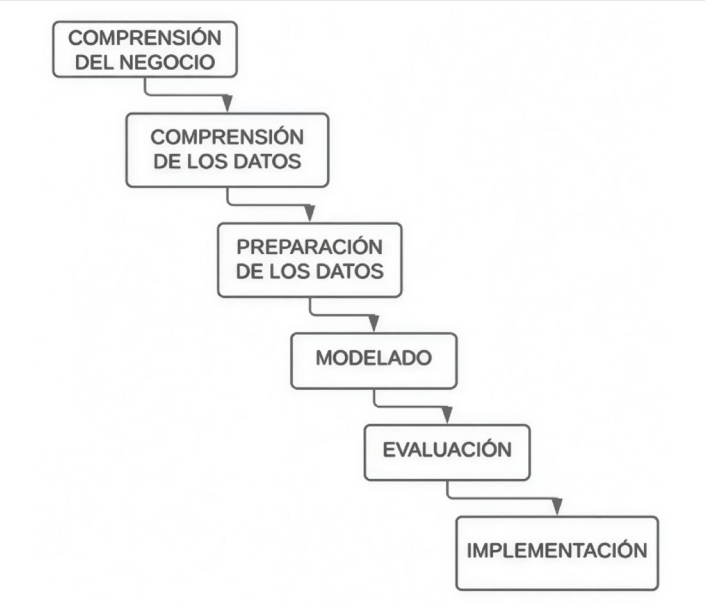


Figura 1: Fases de la metodología Crisp-Dm.
Fuente: Elaboración Propia.

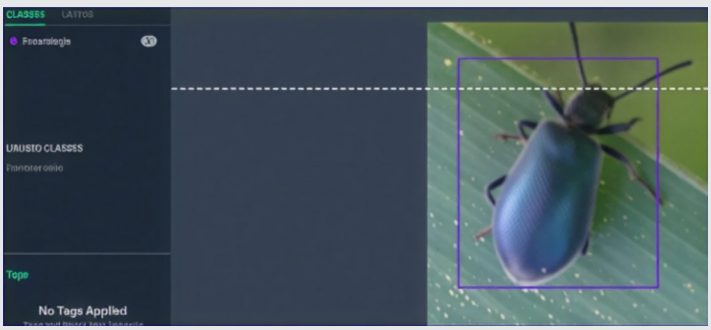


Figura 2: Etiquetado de caja en Roboflow.
Fuente: Elaboración Propia.

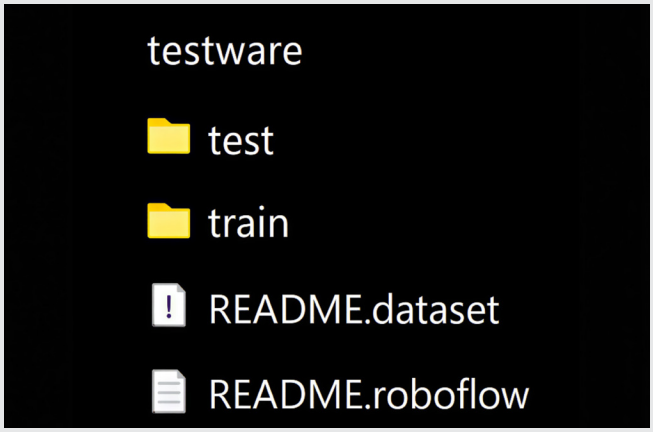


Figura 3: Contenido de conjunto de datos Roboflow.
Fuente: Elaboración Propia.

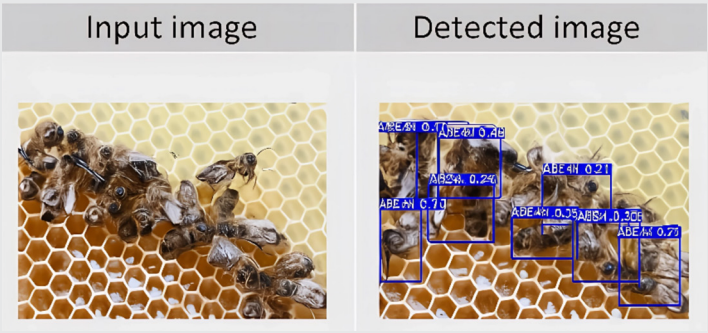


Figura 4: Ejemplo detección Prueba 1.
Fuente: Elaboración Propia.

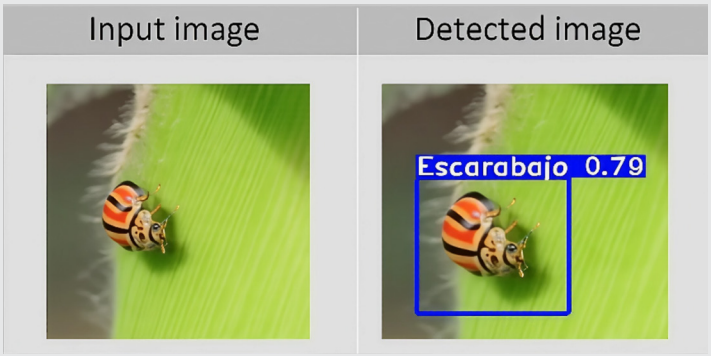
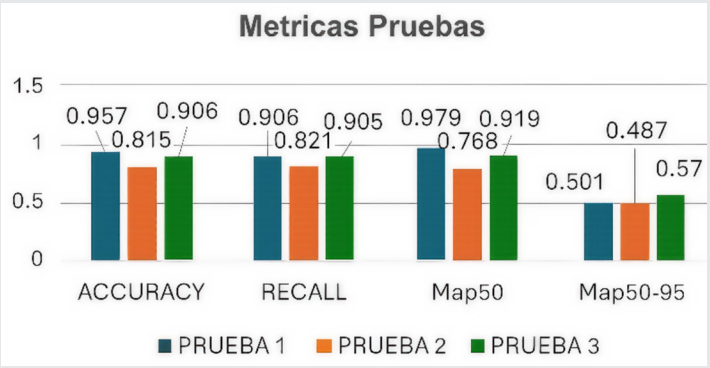


Figura 5: Ejemplo detección Prueba 3.
Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 1. Resultados de Pruebas



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 1. Conjuntos de datos de imágenes de plagas y enfermedades.

NOMBRE	TIPO	TAMAÑO	AUTOR	DESCRIPCIÓN
IP102	PLAGAS	75,000 imágenes	**Wang y otros**	Conjunto de imágenes publico ip102 Este es uno de los conjuntos de datos más grandes para la identificación de plagas de insectos. Contiene más de 75,000 imágenes de 102 categorías de plagas.
TEJOCOTE	ENFERMEDAD	20 IMÁGENES	PROPIO	20 imágenes tomadas de un árbol de tejocote, tomadas con un drone dji mavic mini.
MAÍZ	ENFERMEDADES Y PLAGAS	7,000 IMÁGENES	PROPIO	5 diferentes clases de plagas en maíz (saltamontes, gusano cogollero, escarabajo e insecto), así como hojas de maíz sanas y enfermas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Resultados de Pruebas.

#	Autor	Accuracy
1	Samadhi	95%
2	Wen	69.59%
3	Liu	92.39%
4	Li	96.63%
5	Cabrera	71.42%
6	Propio	95.7%

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Usando los conjuntos de datos previamente descritos en la Tabla 1, se realizaron 3 pruebas, obteniendo los siguientes resultados (Véase gráfica 1). Para cada prueba, los datos se dividieron en un 80 % para entrenamiento y un 20 % para pruebas.

Para la prueba 1 se utilizó el conjunto de datos "IP102" usando dos clases, abejas y hormigas usando un total de 50 imágenes para cada clase respectivamente extraídas del conjunto de datos sometida a 50 épocas de entrenamiento.

Para la prueba dos se utilizó el conjunto de datos "Tejocote" usando una sola clase: "fruto enfermo" usando el total de imágenes del conjunto de datos sometida a 50 épocas de entrenamiento.

En la prueba 3 se utilizó el conjunto de datos "Maíz" usando 4 clases: insecto, saltamontes, gusano cogollero y escarabajo usando 25 imágenes para cada clase respectivamente extraídas del conjunto de datos sometida a 50 épocas de entrenamiento.

Todos los conjuntos de datos fueron etiquetados con Roboflow usando técnicas de aumento como rotación, rotar y recortar para aumentar la variabilidad y robustez del conjunto de datos.

De acuerdo con las pruebas realizadas, como se muestra en la gráfica 1, la Prueba 1 fue la mejor, con una precisión de 0.957. Sin embargo, las otras dos pruebas también muestran un buen desempeño, afectando factores como la calidad de las imágenes y el tamaño de los conjuntos de datos.

Discusión

Esto, en comparación con los trabajos realizados por otros autores, como se muestra en la Tabla 2, demuestra que el modelo YOLOv5 utilizado en este trabajo permite una buena precisión, ya que arroja resultados competitivos con los obtenidos por los autores conocidos en la revisión de la literatura.

Este trabajo propone un método basado en YOLOv5 para la detección de plagas en cultivos cercanos a la comunidad de Santiago Tianguistenco, iniciando con la construcción de conjuntos de datos personalizados, así como el desarrollo de la red neuronal. La calidad y cantidad de imágenes en un conjunto de datos desempeñan un papel crucial en su construcción. Cuantas menos imágenes haya y peor sea su calidad, menor será la precisión del modelo en la detección o su rendimiento será bajo, en comparación con un conjunto de datos que contenga más imágenes y de mejor calidad.

Con el método propuesto en este trabajo, se observó que YOLOv5 es capaz de detectar plagas exitosamente. Además, presenta un alto grado de optimización en comparación con otros modelos utilizados para la detección de plagas. Como trabajo futuro, se propone ampliar los conjuntos de datos, así como aumentar las épocas de entrenamiento del modelo.

CONCLUSIONES

La aplicación de inteligencia artificial, en particular el uso del modelo YOLOv5, representa un avance significativo en la identificación temprana de plagas y enfermedades en cultivos agrícolas. Esta tecnología permite una detección rápida, precisa, lo cual resulta fundamental para mitigar pérdidas económicas, reducir el uso excesivo de pesticidas y mejorar la toma de decisiones en el manejo agrícola.

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que los modelos de detección basados en redes neuronales convolucionales son altamente eficientes en la clasificación y localización de elementos visuales clave en las plantas. Además, el uso de herramientas como drones o cámaras móviles para la recolección de imágenes

permite una mayor cobertura de terreno y facilita la implementación práctica de este sistema en campo.

El uso de YOLOv5 en la agricultura inteligente no solo optimiza el monitoreo fitosanitario, sino que también abre la puerta a sistemas de producción más sostenibles, autónomos y resilientes frente a los desafíos que enfrenta el sector agrícola actual.

Como contribución a la comunidad científica, se comparten los conjuntos de datos recolectados para que puedan ser utilizados en estudios posteriores con enfoques similares al de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS
Quisiera agradecer al Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco por su apoyo y colaboración en el desarrollo de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] L. X. Zelaya-Molina, I. F. Chávez-Díaz, S. De los Santos-Villalobos, C. I. Cruz-Cárdenas, S. Ruíz-Ramírez y E. Rojas-Anaya, «Control biológico de plagas en la agricultura mexicana,» Revista mexicana de ciencias agrícolas, vol. 13, nº SPE27, pp. 69-79, 2022.

[2] FAO, «The State of Food and Agriculture,» 2021.

[3] D. Rizzo, M. Lichtveld, J. A. Mazet, E. Togami y S. A. Miller, «Plant health and its effects on food safety and security in a One Health framework: four case studies,» One Health Outlook, pp. 3-6, 2021.

[4] Secretaría del Campo, «Estadísticas Secretaría del Campo,» 2023. [En línea]. Available: https://secampo.edomex.gob.mx/estadisticas.

[5] L. Rouhiainen, «Inteligencia Artificial,» de Inteligencia artificia, Madrid, Alienta, 2018, pp. 20-21.

[6] J. S. B. R. F. A. D. &. Q. M. W. V. Segovia, «Estudio del uso de técnicas de inteligencia artificial aplicadas para análisis de suelos para el sector agrícola,» RECIMUNDO, pp. 4-19, 2021.

[7] K. Herath y H. M. Samadhi Chathuranga Rathnayaka, «Smart agriculture: Real-time pest detection in rice crops with YOLOv8 and ESP-32 camera technology,» International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology, p. 705, 2023.

[8] F. A. Li Dawei, N. Wu y A. S. Sethi, «YOLO-JD: A Deep Learning Network for Jute Diseases and Pests Detection from Images,» Plants, p. 937, 2022.

[9] C. C. H. M. Z. Z. T. Y. C. S. H. &. C. H. Wen, «Pest-YOLO: A model for large-scale multi-class dense and tiny pest detection and counting,» Frontiers in Plant Science, p. 13, 2022.

[10] L. Jun y X. Wang, «Tomato diseases and pests detection based on improved Yolo V3 convolutional neural network,» Frontiers in Plant Science, p. 11, 2020.

[11] C. Cabrera Zúñiga, «Identificador de plagas con Deep Learning,» Universidad Nacional Autónoma de México, FES Cuautitlán, 2021.

[12] V. A. Avaria, D. Diego-Tortosa y S. Morell-Monzó, «Detección de silbidos de mamíferos marinos en espectrogramas utilizando yolo-v5,» Tesis de licenciatura, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, 2023.

[13] G. Rongli, L. Yong y X. Guohui, «TL-YOLOv8: A Blueberry Fruit Detection Algorithm Based on Improved YOLOv8 and Transfer Learning,» IEEE Access, pp. 86378-86390, 2024.

[14] R. Salas, «Redes neuronales artificiales,» Universidad de Valparaíso. Departamento de Computación, pp. 1-7, 2024.

[15] B. Montenegro y M. Flores-Calero, «Detección de peatones en el día y en la noche usando YOLO-v5,» Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología, pp. 85-95, 2022.

[16] S. f. M. Mini, «DJI,» 2019. [En línea]. Available: https://www.dji.com/mx/support/product/mavic-mini.

[17] L. Esnaola, «Experiencia de uso de Google Colaboratory en Sistemas Inteligentes,» 2022.

Ciencias de la Computación

Ingeniantes

Redes Convolucionales para Agricultura: MobileNetV3 vs. InceptionV3 en el Reconocimiento de Enfermedades en Fresas

RESUMEN: La detección temprana de enfermedades en plantas, como el tizón foliar y cenicilla, es esencial para minimizar pérdidas económicas y preservar la calidad de los cultivos. Para ello, resulta indispensable contar con métodos de diagnóstico que sean precisos, accesibles y eficientes. En este contexto, las redes neuronales profundas han demostrado un gran potencial en el ámbito agrícola, particularmente en el análisis de imágenes foliares para identificar síntomas en etapas iniciales. El presente estudio propone el desarrollo de un sistema de clasificación de enfermedades en hojas de fresa, basado en modelos preentrenados de redes neuronales convolucionales (CNN), específicamente MobileNetV3 e InceptionV3. La metodología incluyó la recolección y preprocesamiento de imágenes, seguidos del entrenamiento, ajuste y validación de ambos modelos. El desempeño de las redes se evaluó mediante métricas estándar como precisión, sensibilidad y especificidad. Los resultados obtenidos permiten una comparación detallada entre MobileNetV3 e InceptionV3, contribuyendo al desarrollo de herramientas inteligentes para la detección eficiente de enfermedades en hojas de fresa. Este avance abre la posibilidad de implementar soluciones portátiles para el diagnóstico en campo, fortaleciendo así el enfoque de agricultura inteligente.

PALABRAS CLAVE: agricultura inteligente, redes neuronales convolucionales (CNN), clasificación de imágenes, enfermedades de la fresa, MobileNetV3-Small, InceptionV3.

Colaboración
Ever Essaú Rodríguez Sandoval; Raquel Ochoa Ornelas; Ansel Yoan Rodríguez González, Tecnológico Nacional de México / Ciudad Guzmán

Fecha de recepción: 10 de septiembre de 2025
Fecha de aceptación: 14 de septiembre de 2025

ABSTRACT: Early detection of plant diseases, such as Leaf Scorch and Powdery Mildew, is essential to minimize economic losses and preserve crop quality. In this context, deep neural networks have shown great potential in the agricultural field, particularly in the analysis of leaf images to identify symptoms in early stages. The present study proposes the development of a strawberry leaf disease classification system based on pretrained convolutional neural network (CNN) models, specifically MobileNetV3 and InceptionV3. The methodology included image collection and preprocessing, followed by training, tuning, and validation of both models. The performance of the networks was evaluated using standard metrics such as accuracy, sensitivity and specificity. The results obtained allow a detailed comparison between MobileNetV3 and InceptionV3, contributing to the development of intelligent tools for efficient disease detection in strawberry leaves. This breakthrough opens the possibility of implementing portable solutions for in-field diagnostics, thus strengthening the smart agriculture approach.

KEYWORDS: intelligent agriculture; convolutional neural networks (CNN); image classification; strawberry diseases; MobileNetV3-Small; InceptionV3.

INTRODUCCIÓN

Las fresas representan un cultivo de gran relevancia para la agricultura mexicana y desempeñan un papel clave en la eco-

nomía global, debido a su alta demanda en los mercados internacionales. México se ha posicionado como uno de los tres principales exportadores de esta fruta, con ingresos cercanos a los 400 millones de pesos en 2020, impulsados principalmente por la producción en estados como Michoacán, Baja California, Jalisco y Guanajuato [1].

Sin embargo, este crecimiento sostenido se ve amenazado por la presencia de enfermedades y plagas de alto impacto, como la cenicilla, Diplocarpon earlianum, Tetranychus urticae y Heliothis virescens. Estos agentes no solo comprometen la calidad y el volumen de la producción, sino que, en algunos casos, también representan riesgos para la salud humana [2].

Frente a este panorama, resulta imprescindible el desarrollo de sistemas eficaces para la detección temprana y el monitoreo continuo de problemas fitosanitarios. En este contexto, la Agricultura de Precisión (AP) ha experimentado un notable auge en los últimos años, integrando tecnologías como la robótica, la teledetección, el análisis de datos y el procesamiento de imágenes para optimizar la gestión de los cultivos [3]. Particularmente, el procesamiento de imágenes y el aprendizaje automático se han consolidado como herramientas eficaces para la detección temprana de plagas y enfermedades, permitiendo análisis rápidos, precisos y rentables a partir de imágenes de hojas, tallos, flores y frutos. Estos métodos, además, posibilitan estimar la severidad de una enfermedad comparando las áreas afectadas con la totalidad de la planta [4].

No obstante, a pesar de los avances en sensores hiperespectrales, su elevado costo limita la adopción por parte de pequeños y medianos productores. En este sentido, el uso de dispositivos móviles y cámaras convencionales en espectro visible se plantea como una alternativa viable y económica para democratizar el acceso a herramientas de diagnóstico, especialmente en regiones rurales con recursos limitados [5].

En la actualidad, la mayoría de los estudios se enfocan en diferentes cultivos o emplean arquitecturas costosas en términos computacionales [6], lo cual dificulta su implementación en dispositivos móviles. No obstante, trabajos recientes muestran la viabilidad de modelos ligeros en condiciones reales de campo [7]. En este sentido, este trabajo se diferencia al comparar el desempeño de MobileNetV3 e InceptionV3 exclusivamente en hojas de fresa, con el propósito de detectar enfermedades en una etapa temprana y determinar cuál arquitectura resulta más adecuada para su despliegue en entornos agrícolas reales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se detalla un planteamiento sistemático de varias etapas clave para llevar a cabo el estudio, que se muestra en términos generales en la Figura 1.

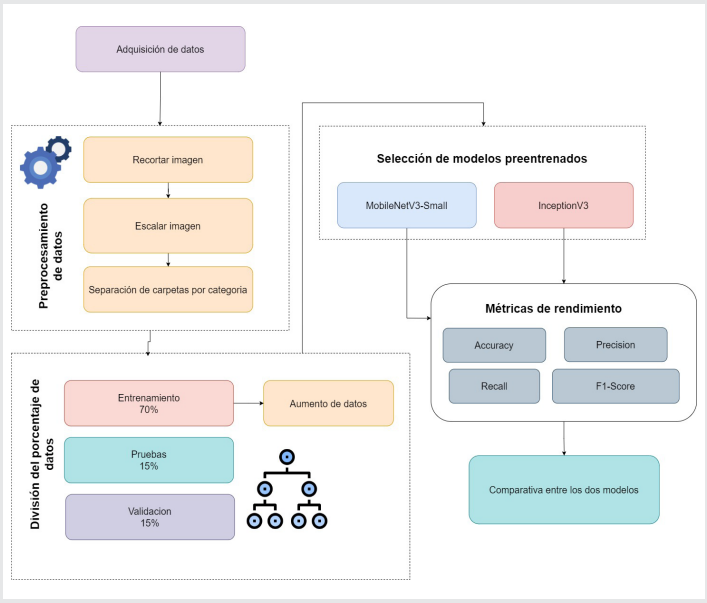


Figura 1: Método propuesto para la clasificación de enfermedades de las hojas de fresa.
Fuente: Elaboración propia.

Conjunto de datos

El conjunto de datos utilizado en este estudio fue recopilado a partir de múltiples fuentes, incluyendo invernaderos locales, campos de cultivo y repositorios públicos como Kaggle [8]. Las imágenes provinieron principalmente de cámaras digitales convencionales y teléfonos móviles, en condiciones variadas de iluminación natural y artificial, así como con diferencias en ángulos de captura. Estas variaciones se mantuvieron deliberadamente para simular escenarios reales de trabajo en campo.

Tabla 1. Cantidad de imágenes obtenidas por fuente.

Fuente	Cantidad de imágenes
Kaggle	1400
Invernaderos	150
Campos de cultivo	168

Fuente: Elaboración propia.

Para garantizar diversidad real, se aplicó el algoritmo de hashing perceptual, el cual consiste en transformar cada imagen en una representación numérica reducida que permite comparar similitudes. Se estableció un umbral de distancia de Hamming de 5 bits para determinar duplicados; es decir, si dos imágenes difieren en menos de cinco posiciones, una de ellas se elimina. Esto permitió depurar imágenes redundantes y asegurar mayor representatividad del conjunto final. Tras la consolidación, el dataset quedó conformado por 4,276 imágenes de hojas de fresa, clasificadas en cinco categorías: saludable, tizón foliar, cenicilla, blossom bli-

ght y tizón angular, con resolución original de 419 x 419 píxeles. Con el fin de balancear las clases, se empleó la librería Augmentor en Python para realizar aumentos mediante rotaciones, escalados, giros y variaciones de brillo. La Figura 2 muestra ejemplos representativos de cada clase. Con el objetivo de mejorar la variabilidad y balancear las clases, se empleó la biblioteca Augmentor de Python. A partir de un conjunto inicial de 1,808 imágenes donde: 700 saludables, 380 con leaf scorch, 329 con cenicilla, 125 con blossom y 274 con angular leaf scorch; fueron aumentadas mediante transformaciones estocásticas como rotaciones, escalados, giros y cambios de brillo, equilibrando así cada clase a 700 imágenes. Estas técnicas ayudan a simular condiciones del mundo real y a mejorar la capacidad de generalización de los modelos durante el entrenamiento.

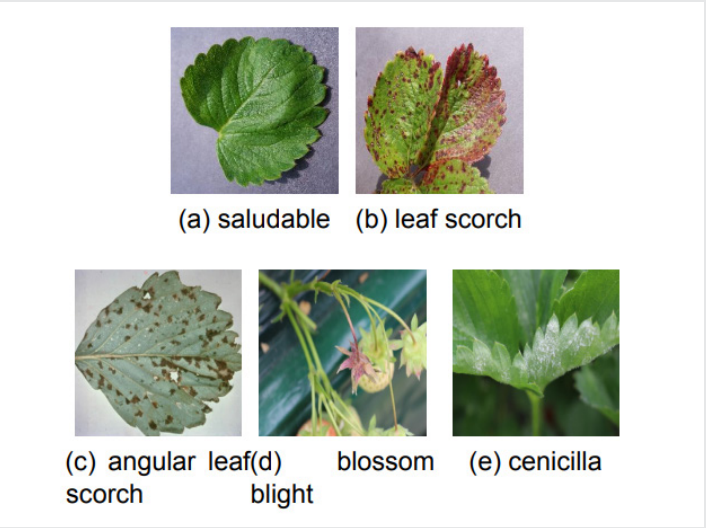


Figura 2: Muestras del conjunto de datos separados por categoría.
Fuente: Elaboración propia.

Preprocesamiento de datos

La etapa de preprocesamiento incluyó la organización sistemática del conjunto de datos, cargando imágenes desde directorios etiquetados según la clase correspondiente. Las imágenes, originalmente en formato RGB, fueron redimensionadas a 224 x 224 píxeles para ajustarse a los requerimientos de entrada de las arquitecturas MobileNetV3 e InceptionV3. Se empleó la clase ImageDataGenerator de TensorFlow para realizar el aumento de datos y cargar las imágenes durante el entrenamiento. Entre las transformaciones aplicadas se incluyeron rotación, traslación, ajustes de brillo y contraste, con el objetivo de incrementar la variabilidad y reducir posibles sesgos en la clasificación. El conjunto fue dividido con barajado y estratificación en subconjuntos de entrenamiento (70%), validación (15%) y prueba (15%), asegurando una distribución representativa de las clases. Este enfoque permitió construir un conjunto de datos balanceado y representativo, adecuado para evaluar la generalización de los modelos en condiciones realistas.

MobileNetV3-SMALL

En otras investigaciones [9] se presenta una modificación de MobileNetV3-small como un modelo de clasificación capaz de ofrecer un alto rendimiento en dispositivos con recursos limitados, como teléfonos móviles o sistemas embebidos [9].

En particular, MobileNetV3-Small se desarrolló con el objetivo de equilibrar precisión y eficiencia computacional, lo que la convierte en una excelente opción para tareas de clasificación de imágenes en tiempo real en entornos con capacidad de cómputo restringida. La Figura 3 muestra de forma esquemática su arquitectura. Una comparación entre los modelos MobileNetV3-Large y EfficientNet-B0 para la clasificación de enfermedades en hojas de fresa para su implementación en dispositivos con baja capacidad de procesamiento y almacenamiento, como sistemas embebidos o móviles [10].

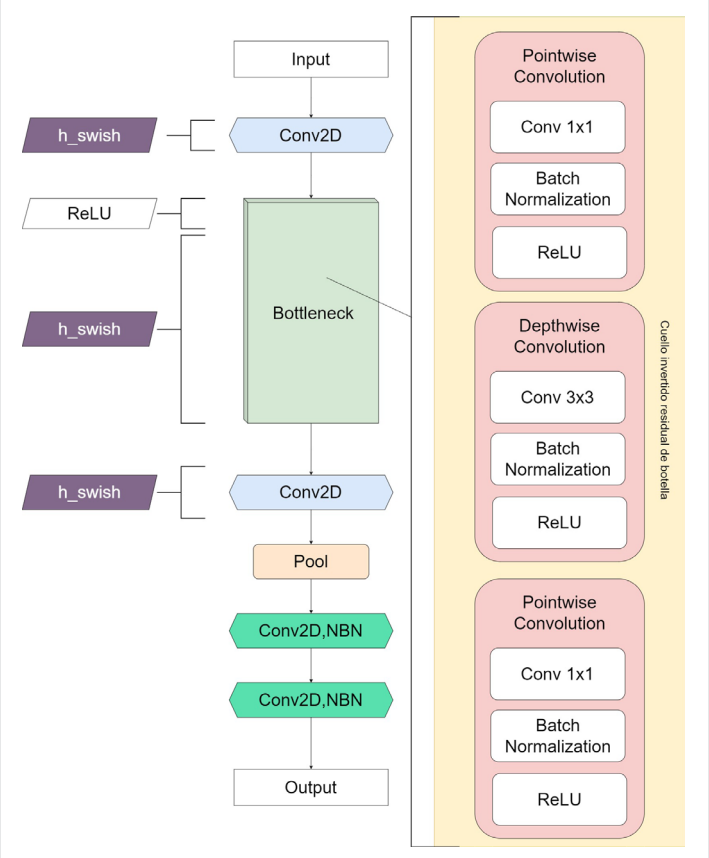


Figura 3: Arquitectura de MobileNetV3-Small.
Fuente: Elaboración propia.

InceptionV3

El modelo InceptionV3 es una red neuronal convolucional profunda ampliamente utilizada en tareas de clasificación de imágenes debido a su alta precisión y capacidad para aprender representaciones complejas. Sin embargo, su entrenamiento desde cero requiere recursos computacionales considerables, lo cual limita su uso en entornos con capacidades restringidas.

Para superar esta limitación, se aplica el aprendizaje por transferencia [11,12] , utilizando una versión preentrenada sobre el conjunto de datos ImageNet. En este enfoque, se conservan los pesos de las capas convolucionales y se sustituye la capa densa final, la cual es reentrenada con imágenes de hojas de fresa clasificadas en cinco categorías: saludable, leaf scorch, cenicilla, blossom y angular. La Figura 4 ilustra la arquitectura de InceptionV3 utilizada en este estudio.

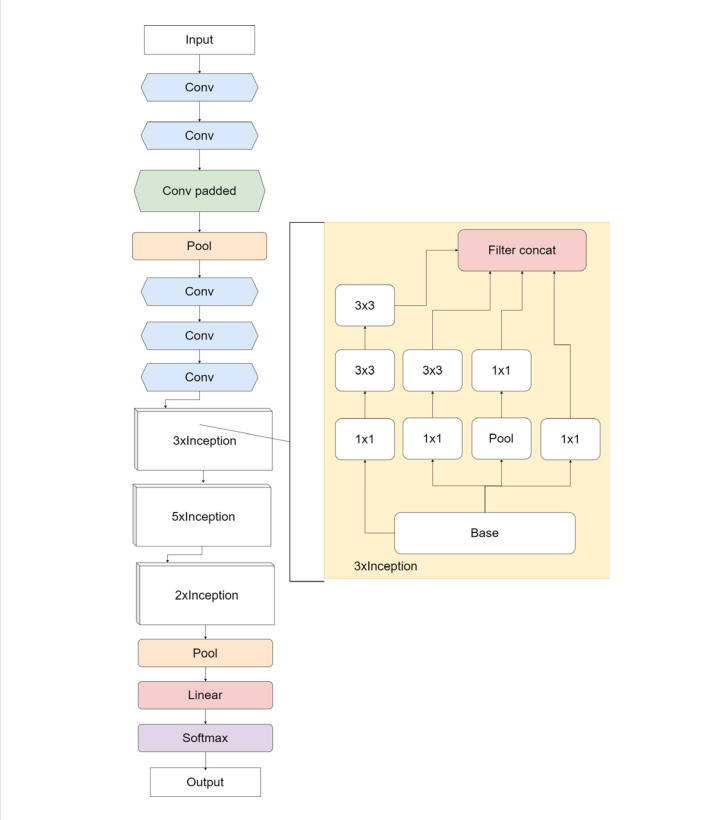


Figura 4: Arquitectura de InceptionV3.
Fuente: Elaboración propia.

Configuración de entorno y entrenamiento

Los modelos fueron entrenados en un entorno Anaconda, utilizando Python 3.9.21 en un equipo computacional con 32 GB de RAM, 5 GB de memoria de intercambio y 5 GB de almacenamiento libre. Aunque no se realizaron modificaciones arquitectónicas, el desempeño de los modelos depende en gran medida de contar con imágenes bien etiquetadas y preprocesadas, lo que resalta la importancia de procesos robustos de curación de datos. Se empleó un tamaño de lote de 16 y una configuración de early stopping con una paciencia de tres épocas para evitar sobreajuste, permitiendo detener el entrenamiento cuando la pérdida de validación no mejoraba. El número máximo de épocas fue de 30, y se utilizaron generadores de datos para alimentar los conjuntos de entrenamiento y validación de forma eficiente. Los modelos fueron optimizados con Adam (Adaptive Moment Estimation), configurando una tasa de aprendizaje de 0.0001. La función de pérdida utilizada fue la sparse categorical crossentropy, adecuada para tareas de clasificación multiclase con etiquetas enteras. En la ecuación 1 se presenta dicha función:

$$L = -\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} \quad log\ (\hat{p}_{y^{(n)}}^{(n)})\ , \qquad \text{Ec. (1)}$$

donde L es la pérdida promedio de la Sparse Categorical Crossentropy, N es el número total de muestras en el conjunto de datos, $y^{(n)}$ es la etiqueta verdadera (entera) de la muestra n, con $y^{(n)} \in \{0,1,\dots,C-1\}$, $\hat{p}_{y^{(n)}}^{(n)}$ es la probabilidad predicha por modelo para la clase correcta $y^{(n)}$ en la muestra n, y C el número total de clases posibles.

RESULTADOS

Los resultados preliminares muestran diferencias relevantes entre ambas arquitecturas. Es importante señalar que la calidad y condiciones de captura de las imágenes influyen parcialmente en el desempeño de los modelos, particularmente en clases con síntomas leves o condiciones de iluminación desiguales. En la Figura 5(a) y 5(b) se presentan las curvas de exactitud y pérdida correspondientes a las fases de entrenamiento y validación del modelo MobileNetV3. De forma similar, la Figura 6(a) y 6(b) muestra las mismas métricas para el modelo InceptionV3. En cuanto al aumento de datos, se realizaron experimentos de validación que confirmaron que no se produjo un sobreajuste severo. El uso de early stopping y la división estratificada de los conjuntos (70% entrenamiento, 15% validación, 15% prueba) contribuyó a mitigar este riesgo. Sin embargo, debe considerarse que, en algunas clases, la proporción de imágenes sintéticas fue elevada, lo que podría afectar la capacidad de generalización en escenarios totalmente nuevos.

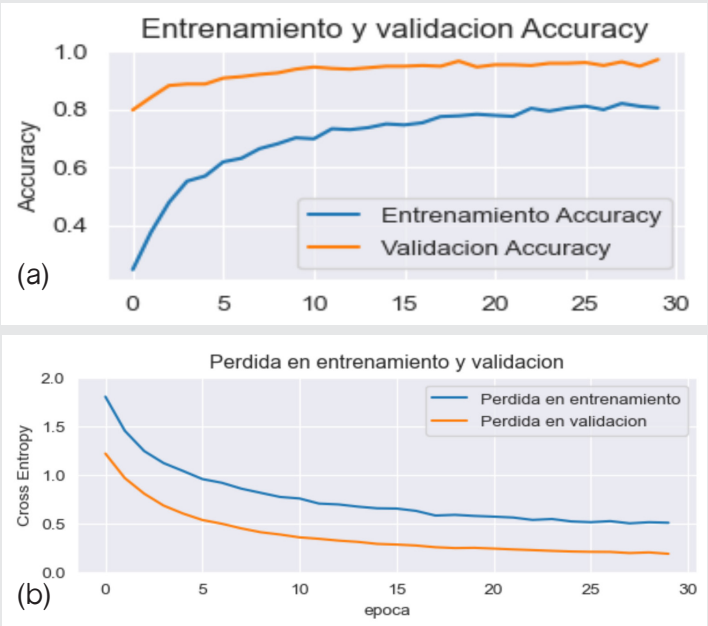


Figura 5. Curvas de exactitud y pérdidas a lo largo de épocas de MobileNetV3. (a) Precisión de entrenamiento y validación, (b) Pérdida de entrenamiento y validación.
Fuente: Elaboración propia.

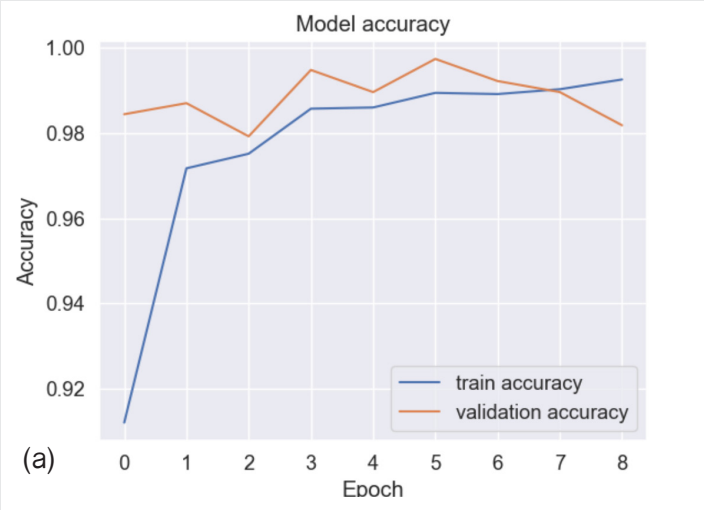


Figura 6: Curvas de precisión y pérdidas a lo largo de épocas de InceptionV3. (a) Precisión de entrenamiento y validación (b) Pérdida de entrenamiento y validación.
Fuente: Elaboración propia.

InceptionV3

La evaluación final del modelo InceptionV3 se llevó a cabo utilizando el conjunto de validación, obteniendo una precisión (ecuación 2) del 98.18%, lo que indica un alto grado de exactitud en sus predicciones. Esto demuestra una excelente capacidad de generalización y un mínimo sobreajuste por parte del modelo. Asimismo, las métricas de recuperación (ecuación 3) y F1-Score (ecuación 4) oscilaron entre el 96% y 98% para las distintas clases, lo cual confirma la eficacia del modelo en la clasificación de enfermedades. La precisión evalúa qué proporción de las predicciones positivas fue realmente correcta; la recuperación mide cuántos de los casos positivos reales fueron correctamente identificados por el modelo; y el F1-score combina ambas métricas en un solo valor que representa el equilibrio entre precisión y recuperación, especialmente útil cuando se presentan clases desbalanceadas. En la Figura 7 se muestra la matriz de confusión, una herramienta que permite visualizar el desempeño del modelo en términos de verdaderos positivos, falsos negativos, falsos positivos y verdaderos negativos. El modelo InceptionV3 demostró un desempeño sobresaliente, clasificando correctamente los casos con errores mínimos.

$$Precisión = \frac{TP}{TP + FP} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$F1 - Score = \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad \text{Ec. (4)}$$

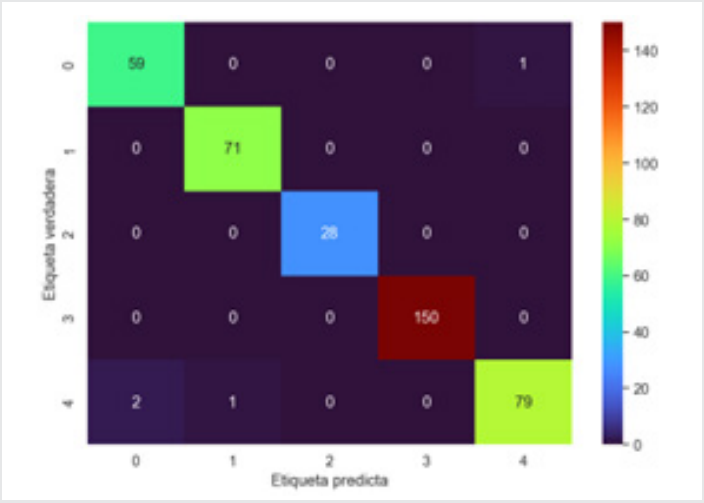


Figura 7: Matriz de confusión del InceptionV3, en donde 0: Angular leaf scorch, 1: Cenicilla, 2: Blossom Blight, 3: Saludable, 4: leaf scorch
Fuente: Elaboración propia

La Tabla 2 muestra que el modelo InceptionV3 obtuvo un rendimiento consistentemente alto en todas las clases evaluadas, destacando blossom blight y saludable, que alcanzaron métricas perfectas. Otras clases como cenicilla y leaf scorch lograron F1-scores cercanos al 97%, mientras que angular leaf scorch obtuvo la puntuación más baja con un respetable 97%.

Tabla 2. Resultados por clase para InceptionV3.

Clase	Precisión	Recall	F1-Score
Angular leaf scorch	96%	98%	97%
Cenicilla	98%	100%	99%
Blossom blight	100%	100%	100%
Saludable	100%	100%	100
Leaf scorch	98%	96%	97%

Fuente: Elaboración propia.

MobileNetV3-Small

La evaluación final de MobileNetV3- Small se realizó con el conjunto de validación y arrojó una exactitud del 82% durante el entrenamiento. Este modelo arrojó porcentajes inferiores para puntuación F1: 86%, recuperación: 94% y precisión: 91%. En la Figura 8 se demuestra un mayor error de clasificación especialmente en la clase de leaf scorch, seguido de angular leaf scorch.

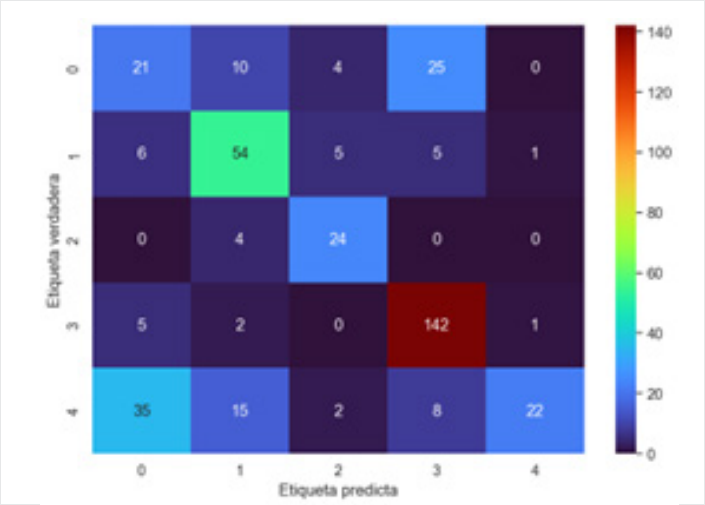


Figura 8: Matriz de confusión del MobileNetV3-Small, en donde 0: Angular leaf scorch, 1: Cenicilla, 2: Blossom Blight, 3: Saludable, 4: leaf scorch.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 revela que MobileNetV3-Small presentó una mayor variabilidad en el rendimiento entre clases. La clase Saludable mostró una disminución notable en comparación con InceptionV3, y angular leaf scorch obtuvo el F1-score más bajo de todos los casos evaluados, con 84%. Esta caída podría explicarse por la similitud visual con otras enfermedades y la menor capacidad de representación del modelo.

Tabla 3. Resultados por clase para MobileNetV3-Small.

Clase	Precisión	Recall	F1-Score
Angular leaf scorch	90%	93%	85%
Cenicilla	92%	94%	87%
Blossom blight	93%	96%	88%
Saludable	89%	95%	86%
Leaf scorch	91%	92%	84%

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados preliminares reflejan las características de cada arquitectura: InceptionV3, más profunda y compleja, logra una mejor generalización, mientras que MobileNetV3-Small, optimizado para eficiencia, sacrifica precisión en clases visualmente similares. La Tabla 4 resume los promedios generales de precisión, recuperación y F1-score, permitiendo comparar globalmente el desempeño de ambos modelos.

Tabla 4. Resultados globales entre InceptionV3 y MobileNetV3-Small.

Modelo	Exactitud	Precisión	Recall	F1-Score
InceptionV3	98.18%	98%	98%	98.7%
MobileNetV3-Small	82%	91%	94%	86%

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra que el uso de aprendizaje por transferencia con arquitecturas como InceptionV3 y MobileNetV3-Small es una estrategia eficaz para la clasificación automática de enfermedades en hojas de fresa. Los resultados obtenidos evidencian que es posible desarrollar modelos precisos, eficientes y adaptables, adecuados para diferentes contextos agrícolas según las restricciones técnicas del entorno. En este trabajo, las imágenes provinieron deliberadamente de dispositivos móviles, con variaciones en ángulos de captura y en condiciones de iluminación natural y artificial, con el objetivo de simular un entorno real de uso. Un aspecto relevante a explorar en trabajos posteriores es el impacto específico de estos parámetros en los resultados, ya que conocer esta influencia permitiría anticipar la factibilidad de integrar los modelos en dispositivos concretos y bajo condiciones determinadas de operación.

No obstante, el estudio presenta algunas limitaciones: el conjunto de datos, aunque representativo, sigue siendo relativamente pequeño; la dependencia de la calidad y el ángulo de captura puede afectar la robustez en escenarios no controlados; y el aumento intensivo de datos en ciertas clases plantea la necesidad de validar la generalización en conjuntos externos no aumentados.

Como trabajo futuro, se plantea la implementación de estos modelos en dispositivos móviles, aplicando técnicas de cuantización y poda de parámetros para reducir su tamaño. Asimismo, se propone ampliar el dataset con nuevas imágenes de enfermedades capturadas en condiciones diversas y emplear técnicas de aumento avanzadas, como modificaciones cromáticas o simulaciones de ruido de campo, para mejorar la capacidad de generalización.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Tecnológico Nacional de México (TecNM) bajo el número de proyecto [22298.25-P].

BIBLIOGRAFÍA

[1]Rocha-Ibarra, J.E., Mireles-Arriaga, A.I., Ruiz-Nieto, J. E., & Maki-Díaz, G. (2024). Production and ex-

port of berries in Mexico's agricultural development: A study of competitive advantage. Agrociencia, 1–14.

[2] Rehman, S., Attique Khan, M., Alhaisoni, M., Armghan, A., Alenezi, F., Alqahtani, A., Vesal, K., & Nam, Y. (2023). Fruit leaf diseases classification: A hierarchical deep learning framework. Computers, Materials & Continua, 75(1), 1179–1194.
[3] Ngugi, L. C., Abelwahab, M., & Abo-Zahhad, M. (2021). Recent advances in image processing techniques for automated leaf pest and disease recognition – A review. Information Processing in Agriculture, 8(1), 27–51.

[4] Biswas, M., Ray, M., Jahan, I., Khan, S., Ahmad Saad, S., & Bharman, P. (2022). Deep learning in agriculture: A review. Asian Journal of Research in Computer Science, 28–47.

[5] Galván García, A. C., Sánchez, M. G., & Rodríguez González, A. J. (2024). Desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo agrícola basado en micromódulos: Un enfoque integrado para la gestión de plantaciones. Ingeniantes, 3(1), 104–112.

[6] Afzaal, U., Bhattarai, B., Pandeya, Y. R., & Lee, J. (2021). An instance segmentation model for strawberry diseases based on Mask R-CNN. Sensors, 21(19), 6565.

[7] Cao, Z., Li, J., Fang, L., Li, Z., Yang, H., & Dong, G. (2025). Research on efficient classification algorithm for coal and gangue based on improved MobileNetV3-small. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 45(2), 437–462.

[8] Pramudhita, D. A., Azzahra, F., Arfat, I. K., Magdalena, R., & Saidah, S. (2023). Strawberry plant diseases classification using CNN based on MobileNetV3-Large and EfficientNet-B0 architecture. Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika, 9(3), 522–534.

[9] Ochoa-Ornelas, R., Gudiño-Ochoa, A., García-Rodríguez, J. A., & Uribe-Toscano, S. (2024). Lung and colon cancer detection with InceptionResNetV2: A transfer learning approach. Journal of Research and Development, 10(25).

[10] Li, L., Zhang, S., & Wang, B. (2021). Plant disease detection and classification by deep learning—A review. IEEE Access, 9, 56683–56698.

Ciencias de la Computación

Ingeniantes

Plataforma Web de Firmado Digital basada en Infraestructura de Clave Publica para la Transformación hacia la Universidad Digital

Colaboración
Jaziel Isai Anguiano Mariz; Ismael Amezcua Valdovinos; Patricia Elizabeth Figueroa Millán, Tecnológico Nacional de México / Campus Colima

Fecha de recepción: 05 de noviembre 2025
Fecha de aceptación: 05 de noviembre de 2025

RESUMEN: La pandemia de COVID-19 evidenció las brechas digitales en las instituciones de educación superior (IES), haciendo esencial la transformación hacia una Universidad Digital. Este trabajo aborda las ineficiencias de los procesos manuales de emisión y validación de documentos en la Universidad de Colima mediante Firmare, una plataforma web de firma digital basada en Infraestructura de Clave Pública (PKI). Desarrollada con un enfoque iterativo, la solución garantiza autenticidad, integridad y no repudio. Los resultados de su validación funcional demuestran su capacidad para reducir significativamente los tiempos de emisión, mejorar la trazabilidad y promover la sostenibilidad al disminuir el uso de papel, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Si bien la plataforma ha sido validada, su implementación institucional aún no se ha completado, por lo que se proponen estrategias de adopción como un manual interactivo para facilitar su integración.

PALABRAS CLAVE: Certificados académicos, Firma Digital, Infraestructura de clave pública (PKI), Sostenibilidad, Universidad Digital.

ABSTRACT: The COVID-19 pandemic highlighted the digital gaps in higher education institutions (HEIs), making the transition to a Digital University essential. This work addresses the inefficiencies of manual document issuance and validation processes at the University of Colima through Firmare, a web-based digital signature platform based on Public Key Infrastructure (PKI). Developed with an iterative approach, the solution ensures authenticity, integrity, and non-repudiation. The results of its functional validation demonstrate its capacity to significantly reduce issuance times, improve document traceability, and promote sustainability by decreasing paper use, aligning with the Sustainable Development Goals (SDGs). While the platform has been functionally validated, its institutional implementation has not yet been completed; therefore, adoption strategies such as an interactive manual are proposed to facilitate its integration.

KEYWORDS: Academic certificates, Digital Signature, Public Key Infrastructure (PKI), Sustainability, Digital University.

INTRODUCCIÓN

La transformación digital en las instituciones de educación superior es esencial en el contexto de la Industria 4.0. Las universidades digitales deben modernizar sus procesos administrativos para una gestión inteligente y sostenible [1]. La digitalización impacta la gestión administrativa, donde la falta de automatización y la dependencia de métodos tradicionales como el papel generan ineficiencias [2]. En este contexto, la

gestión documental electrónica y la firma digital son fundamentales. La firma digital basada en Infraestructura de Clave Pública (PKI) utiliza criptografía asimétrica para garantizar la autenticidad, integridad y no repudio de los documentos, siendo ideal para validar certificados académicos [3]

La Universidad de Colima enfrenta la necesidad de optimizar la emisión y validación de certificados, procesos que aún dependen de validaciones manuales, generando ineficiencias y errores. Aunque existen plataformas comerciales de firma digital, su adopción presenta desafíos como altos costos y dificultades de interoperabilidad [1].

El objetivo de esta investigación es presentar Firmare, una plataforma web de firmado digital basada en PKI, diseñada para entornos universitarios, con el fin de agilizar la emisión de documentos académicos y contribuir a la sostenibilidad. Sustentada en PKI y estándares internacionales como X.509 [4], garantiza autenticidad, integridad y no repudio, además de validez legal y protección contra fraudes [2]. Firmare contribuye a la reducción del consumo de papel, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Además, mejora la trazabilidad y auditoría de los documentos, ya que cada acción se registra de forma inmutable [5]. Se plantea que su implementación facilitará la digitalización de procesos, reduciendo tiempos y optimizando recursos.

Revisión de la literatura

La adopción de la firma digital en las IES ha sido impulsada por la necesidad de agilizar la gestión documental. Plataformas comerciales como DocuSign y PandaDoc, aunque populares, enfrentan obstáculos como altos costos de suscripción y baja personalización para entornos universitarios [6], [7], [8].

Como respuesta, algunas instituciones han desarrollado plataformas propias. La Universidad Nacional de Barranca (UNAB) redujo los tiempos de emisión de documentos de 10 días a 1-2 días [8]. Sin embargo, estudios en otras universidades identifican tres factores críticos que limitan la implementación de la firma digital: (1) altos costos, (2) dificultades de integración, y (3) resistencia institucional por falta de cultura digital [8], [9], [10]Esto refuerza la necesidad de abordar la transformación digital de manera integral. Por ello, en este artículo se presenta el desarrollo de Firmare, una plataforma web de firmado digital basada en PKI y diseñada para el entorno universitario, que busca subsanar las limitaciones identificadas mediante el uso de tecnologías de código abierto y una arquitectura adaptable.

MATERIAL Y MÉTODOS

El desarrollo de Firmare se llevó a cabo en la Facultad de Telemática de la Universidad de Colima para automatizar la emisión y gestión de certificados académicos. Su objetivo es reemplazar procesos manuales por una solución basada en PKI, conforme al Código de Comercio [11] y la norma X.509 [4]. Su desarrollo siguió un enfoque iterativo e incremental inspirado en la metodología SCRUM, con una estructura de roles de Desarrollador y Asesor académico.

El proceso se estructuró en sprints con entregables verificables y revisión técnica continua. La estructura metodológica incluyó los siguientes roles y ciclos de trabajo:

- **Desarrollador:** diseño, implementación y pruebas de cada módulo.
- Asesor: revisión semanal de avances y retroalimentación en temas como PKI.

El ciclo de trabajo por sprint incluyó:

- **Planificación:** definición de objetivos por iteración.
- **Ejecución:** implementación de funcionalidades.
- **Revisión:** presentación de resultados al asesor.
- **Ajustes:** corrección de errores e incorporación de mejoras."

A continuación, la Tabla 1 detalla la evolución del desarrollo de Firmare, mostrando las funcionalidades clave implementadas y validadas en cada sprint, lo que subraya el enfoque iterativo e incremental seguido.

Tabla 1. Evolución del desarrollo por sprint.

Sprint	Módulo Desarrollado	Actividades Clave
1	Dashboard de Gestión	-Autenticación de usuarios con Google OAuth 2.0.
		- Carga y almacenamiento de PDFs en Supabase.
		- Integración de la tabla pdf_metadata.
2	Vista de Firma Digital	- Validación de certificados .cer y claves .key.
		- Generación de hashes SHA-256.
		- Incrustación de firmas en PDFs con pdf-lib.
3	Visor Público de Certificados	- Renderizado de PDFs con @react-pdf-viewer.
		- Generación de UUIDs y códigos QR.
		- Implementación de enlaces públicos seguros.

Fuente: Elaboración propia.

La arquitectura de Firmare se organiza en tres capas funcionales principales, cada una de las cuales emplea tecnologías de código abierto para garantizar escalabilidad, seguridad e interoperabilidad:
Frontend: Esta capa se encarga de la interfaz de usuario y la visualización de documentos. Se desarrolló utilizando Next.js [12] e incorpora componentes accesibles de Mantine UI [13]. Para la visualización segura de documentos PDF, se emplea la librería react-pdf-viewer.

Backend: Responsable de la autenticación de usuarios, la gestión de datos y el almacenamiento de archivos. Para estas funciones, se utiliza Supabase [14], que provee servicios de autenticación mediante Oauth 2.0, una base de datos PostgreSQL robusta y capacidades de almacenamiento de archivos.

Criptografía: Esta capa es fundamental para la gestión de claves y la firma digital. Implementa Forge.js [15], una librería que permite trabajar con certificados digitales que cumplen con el estándar X.509 [16] y utiliza el algoritmo RSA-2048 para la generación y verificación de firmas digitales.

Por otro lado, el flujo de interacción entre los componentes de ésta durante el proceso de autenticación del usuario y firma digital de un documento PDF se ilustra a continuación.

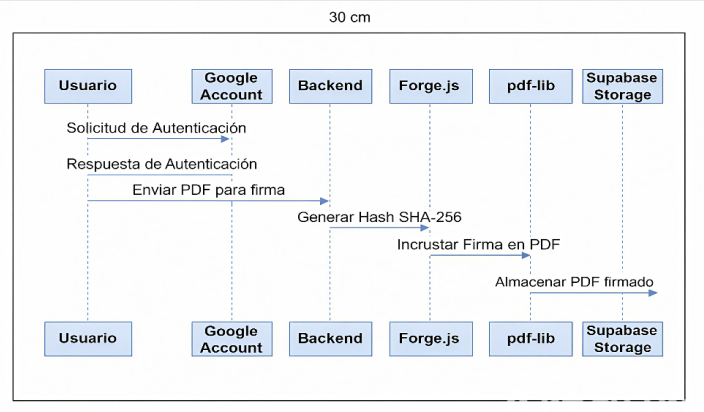


Figura 1. Interacción de componentes en Firmare.
Fuente: Elaboración propia.

Como se presenta en la Figura 1, el proceso se establece como sigue:
Autenticación de usuario: El usuario accede mediante su cuenta de Google. La autenticación se valida vía OAuth 2.0 y permite el acceso al dashboard de la plataforma.

Carga (envío) del documento: El usuario selecciona el archivo PDF a firmar. Se valida el formato, almacena el archivo y registra metadatos como nombre, fecha y estado ("pendiente de firma o firmado").

Generación de hash SHA-256: El backend crea un resumen criptográfico único del documento, el cual es firmado posteriormente con la clave privada del usuario. Este proceso cumple con el estándar X.509 para certificados digitales.

Firma digital del documento: Se firma el hash utilizando RSA-2048. Se incrustan en el PDF elementos de validación como el UUID (Identificador Único Universal) que es una cadena alfanumérica de 36 caracteres [17], la firma en formato Base64, la cadena original, el nombre del firmante, la fecha de firma y un código QR que establece una matriz de puntos o barras bidimensional que sirve para la encriptación de información [18] y el cual se vincula a una URL única para validación pública. Esto se realiza mediante pdf-lib y react-pdf-viewer. Estos metadatos en garantizan documentos únicos, íntegros y verificables. El UUID evita duplicados, el QR permite validación externa mediante URL única, y la firma digital autentica al firmante. La cadena original protege contra alteraciones, mientras los datos de firmante y fecha aportan transparencia.

Almacenamiento del PDF firmado: El documento firmado se guarda en Supabase Storage mediante un bucket privado y se actualiza la base de datos con metadatos finales. El acceso al documento se proporciona mediante un enlace público seguro mediante protocolo TLS.

La plataforma se construyó utilizando Visual Studio Code como entorno de programación y Git para el control de versiones

RESULTADOS

La plataforma Firmare se estructuró en tres vistas interconectadas: Dashboard, vista de firma y visor de certificados firmados, diseñadas para optimizar la gestión documental en la Universidad de Colima.

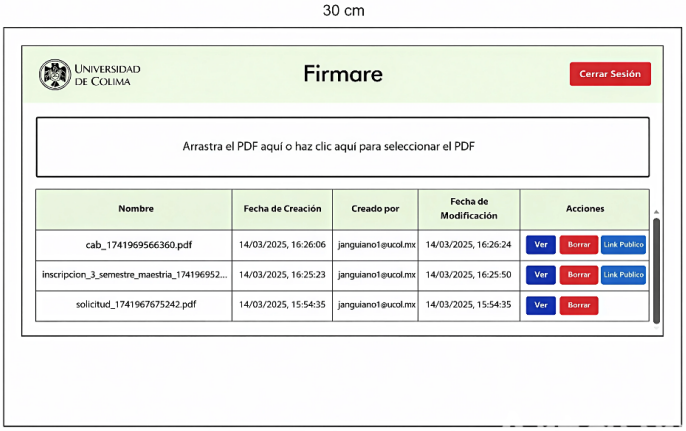


Figura 2 Dashboard.
Fuente: Elaboración propia.

El Dashboard Figura 2, desarrollado con Next.js y Supabase, funciona como el núcleo de gestión de documentos. Los usuarios autenticados mediante

Google OAuth 2.0 cargan, gestionan y dan seguimiento al firmado de certificados académicos en formato PDF, asegurando la trazabilidad documental. La integración con la base de datos PostgreSQL de Supabase permite almacenar metadatos esenciales como el estado de firma y fechas de modificación. Cada acción actualiza automáticamente la interfaz, y el uso de UUIDs únicos evita conflictos de nombres.

En la vista de Firma, se implementó el corazón de la Infraestructura de Clave Pública (PKI). Los usuarios cargan su certificado digital (.cer) y clave privada (.key), validados mediante el estándar X.509 y el algoritmo RSA-2048.

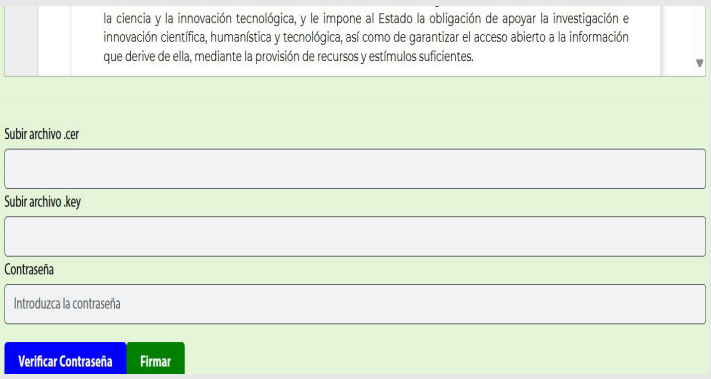


Figura 3 Vista de firma.
Fuente: Elaboración propia.

En la vista de Firma (Figura 3), se implementó el núcleo de la Infraestructura de Clave Pública (PKI). Los usuarios cargan su certificado digital (.cer) y clave privada (.key), que son validados mediante el estándar X.509 y el algoritmo RSA-2048. Tras la verificación de la contraseña, el sistema genera un hash SHA-256 del documento, lo firma digitalmente y lo incrusta en una nueva página del PDF. Esta vista incorpora elementos para la transparencia: un código QR, la fecha de firma y una cadena original que resume los datos del certificado.

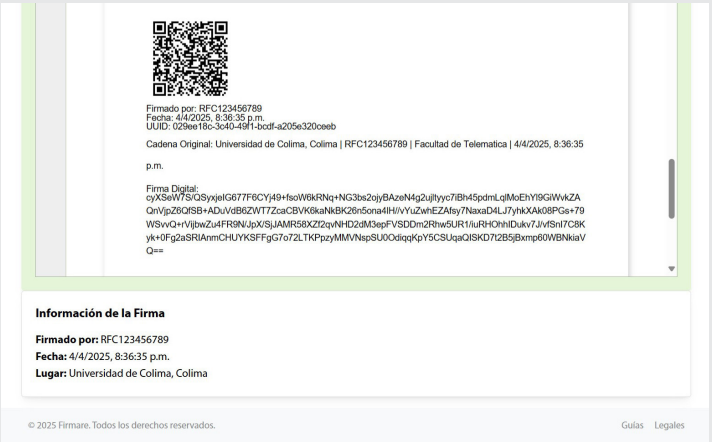


Figura 3 Vista de firma.
Fuente: Elaboración propia.

El visor (Figura 4) permite la verificación externa de documentos. Mediante un enlace público único protegido por un UUID, cualquier persona puede acceder al certificado y validar su autenticidad. La integración de @react-pdf-viewer facilita la visualización del PDF, mientras un panel inferior muestra metadatos esenciales como el nombre del firmante y la firma digital.

La interacción entre los módulos demostró un flujo de trabajo cohesivo, y la arquitectura cumplió con los estándares PKI, estableciendo un modelo escalable. Los resultados confirman la validación funcional y técnica de Firmare, demostrando que sus módulos operan según lo diseñado. Aunque la plataforma está en fase de preparación para su implementación institucional, las pruebas han confirmado su capacidad para realizar las funciones de firmado y validación de manera segura y eficiente.

RESULTADOS

El desarrollo de Firmare demuestra la viabilidad de implementar sistemas de firma digital en entornos universitarios mediante tecnologías de código abierto, ofreciendo una alternativa funcional, personalizable y escalable frente a soluciones comerciales. A continuación, la Tabla 2 presenta una comparación entre Firmare y otras soluciones.

Tabla 1. Evolución del desarrollo por sprint.

Características	DocuSign y PandaDoc	UNAB	Firmare (Propuesta)
Tipo	Comercial	Desarrollo interno	Código abierto + PKI
Costo	Alto (licencias, suscripciones)	Bajo (sin licencias)	Bajo (tecnologías open-source)
Infraestructura	PKI	PKI	PKI
Integración con sistemas existentes	Limitada, adaptación y configuración complejas	Depende de la infraestructura institucional	Alta (Supabase)
Personalización	Moderada (flujos predefinidos)	Alta (adaptable)	Alta (módulos modulares, código abierto)
Dependencia de proveedores	Alta	Moderada (dependencia parcial de RENIEC)	Baja (Supabase bajo demanda)
Estándares	eIDAS, X.509	X.509	X.509
Trazabilidad documental	Sí (registro de auditoría)	Parcial (depende del desarrollo)	Sí (metadatos inmutables, QR, UUID)

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la tabla, Firmare incorpora una infraestructura PKI y el uso de SHA-256 con costos operativos bajos. Ofrece una alternativa funcional y escalable frente a soluciones comerciales como DocuSign, PandaDoc, así como la solución de la UNAB. Firmare asegura los documentos mediante certificados X.509 y hashes SHA-256 para garantizar integridad. Los metadatos inmutables (UUID, QR) se incrustan en el PDF, mientras la autenticación delegada a Google (OAuth 2.0) simplifica el acceso. En términos de costos, Firmare representa una solución de bajo costo al eliminar pagos recurrentes por licencias.

Respecto a la infraestructura, todas las soluciones analizadas emplean PKI, pero Firmare además contempla mecanismos como SHA-256, UUID y códigos QR para fortalecer la trazabilidad. En interoperabilidad, Firmare destaca por su capacidad de integración con sistemas existentes al usar tecnologías estándar y abiertas como PostgreSQL y APIs RESTful. Finalmente, la trazabilidad documental y el uso de estándares como X.509 la convierten en una solución tecnológicamente válida.

Es importante señalar que, debido a que Firmare se encuentra en la fase de preparación para su implementación, este estudio se centra en los resultados de su desarrollo y validación funcional. Las métricas cuantitativas sobre su adopción a gran escala se documentarán en futuros estudios.

CONCLUSIONES

La implementación de Firmare evidenció que la Infraestructura de Clave Pública (PKI) es indispensable para cumplir con los estándares legales y técnicos en la gestión documental universitaria. El empleo del algoritmo SHA-256 asegura la integridad del documento, ya que cualquier modificación posterior alterará el hash, lo que detectará la alteración. Su alineación con el estándar X.509 permite que la firma digital tenga validez legal y sea interoperable.

Durante el desarrollo, se superaron desafíos clave como la validación estricta de certificados para evitar suplantaciones y el cifrado de claves privadas para mitigar accesos no autorizados. La adición de metadatos en páginas separadas del PDF preservó el contenido académico original. Este proyecto posiciona a la Universidad de Colima como un referente en la adopción de tecnologías PKI, demostrando que es posible migrar procesos administrativos tradicionales a entornos digitales sin comprometer la seguridad.

Sin embargo, el éxito a largo plazo dependerá de la adopción por parte del personal y la integración con los sistemas académicos existentes. Como trabajo futuro, se está desarrollando un manual interactivo integrado en la plataforma para facilitar la capacitación del personal. Se considera que Firmare contribuye a la transición a una universidad digital más robusta, transparente y alineada con los desafíos tecnológicos del siglo XXI.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad de Colima la Facultad de Telemática y al sistema de becas nacionales de SECIHTI por el apoyo brindado en el desarrollo de esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] E. Barrientos y Y. Areniz, «Universidad inteligente: Oportunidades y desafíos desde la Industria 4.0», Rev. Ingenio, vol. 16, n.o 1, pp. 56-60, ene. 2019, doi: 10.22463/2011642X.2343.

[2] D. A. C. Gaibor y C. Gaibor, «TRANSFORMACIÓN DIGITAL EN LA UNIVERSIDAD ACTUAL», 2020.

[3] A. A. B. González, «Firma Electrónica o Digital», 2021.

[4] ITU, «Recomendación X.509: Estructura de certificados y listas de revocación de certificados (CRL) para infraestructuras de clave pública (PKI). Unión Internacional de Telecomunicaciones.» 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.itu.int/rec/T-REC-X.509-201910-I/es

[5] M. E. García, «La firma electrónica: Un nuevo paradigma en el derecho.», Universidad Autónoma de Nuevo León, 2005. [En línea]. Disponible en: http://eprints.uanl.mx/20256/1/1020150966.pdf

[6] DocuSign Inc, «DocuSign: Platform for digital signatures.» 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.docusign.com

[7]PandaDoc Inc, «PandaDoc: Document automation and digital signature solution.» 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.pandadoc.com/es/software-firma-electronica/

[8] R. M. Ampuero, «Aplicación de la plataforma de firma digital en la emisión de los documentos académicos de una Universidad Pública», Alpha Centauri, vol. 5, n.o 3, pp. 24-33, sep. 2024, doi: 10.47422/ac.v5i3.176.

[9] J. D. D. Ortega, J. C. De La Cruz Maldonado, y D. Abrego Almazán, «Aplicación de la firma digital en una institución de educación superior», RECAI Rev. Estud. En Contad. Adm. E Informática, vol. 13, n.o 37, p. 15, may 2024, doi: 10.36677/recai.v13i37.22367.

[10] S. Ramos, «DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE FIRMA DIGITAL WEB OPTIMIZADO PARA PROCEDIMIENTOS ADMINISTRATIVOS DE LA

UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI, MOQUEGUA 2024», 2024.

[11] M. Código de Comercio, «Código de Comercio». Diario Oficial de la Federación, 28 de marzo de 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CCom.pdf.

[12] Vercel, «Introduction | Next.js». Accedido: 2 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://nextjs.org/docs.

[13] Mantine, «Getting started | Mantine». Accedido: 2 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://mantine.dev/getting-started/

[14] Supabase, «Supabase: The open source Firebase alternative». 2023. [En línea]. Disponible en: https://supabase.io/.

[15] npm, «node-forge», npm. Accedido: 2 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.npmjs.com/package/node-forge.

[16] Entrust, «¿Qué es una PKI (Infraestructura de clave pública)? | Entrust». Accedido: 2 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.entrust.com/es/resources/learn/what-is-pki.

[17] Cockroachlabs, «What is a UUID, and what is it used for?» Accedido: 2 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.cockroachlabs.com/blog/what-is-a-uuid/.

[18] M. Castro, M. Hernández, y E. Aína, «Mosaico no 38. Revista para la promoción y apoyo a la enseñanza del español - libreria.educacion.gob.es». Accedido: 2 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.libreria.educacion.gob.es/libro/mosaico-no-38-revista-para-la-promocion-y-apoyo-a-la-ensenanza-del-espanol_184086/.

Ciencias de la Computación

Ingeniantes

Sistema de Traducción Automática del Español Mexicano a Glosa de la Lengua de Señas Mexicana mediante Aprendizaje Profundo

Colaboración
Cristian M. Torres-Martínez; Vanessa Abigail Huerta-García; Joel A. Trejo-Sánchez, Tecnológico Nacional de México / Ciudad Guzmán; Jesús Ezequiel Molinar-Solis, Centro de Investigación en Matemáticas; Daniel Fajardo-Delgado, Tecnológico Nacional de México / Ciudad Guzmán

Fecha de recepción: 21 de noviembre de 2025
Fecha de aceptación: 21 de noviembre de 2025

RESUMEN: Este trabajo presenta un sistema de traducción automática de texto en español a la glosa de la lengua de señas mexicana (LSM), una representación intermedia y gramatical que refleja la secuencia de señas de esta lengua. Para el desarrollo del sistema, se construyó un corpus bilingüe LSM-español a partir del diccionario de la LSM de la Ciudad de México, complementado con información lingüística adicional y recursos audiovisuales, y estructurado en una base de datos relacional. Posteriormente, utilizando el modelo NLLB de Meta, se realizó un ajuste fino con dicho corpus, generando tres variantes del modelo: ES-LSM1, ES-LSM2 y ES-LSM3. La calidad de cada versión se evaluó con las métricas BLEU, ROUGE y ChrF, observándose mejoras significativas en cada versión, incluso con una cantidad limitada de datos. En particular, la versión ES-LSM3 alcanzó resultados destacados con 84% en ROUGE, 75% en ChrF y hasta 65% en BLEU-1, reflejando traducciones con alta precisión léxica y correspondencia con las frases de referencia. Finalmente, el modelo ES-LSM3 se integró en una interfaz gráfica que permite traducir palabras del español a glosa de la LSM y reproducir videos que muestran brevemente el uso de una seña para cada palabra o, en su defecto, el deletreo dactilológico.

PALABRAS CLAVE: Aprendizaje profundo, compilación de corpus, glosa de la LSM, lengua de señas mexicana, sistema de traducción automática.

ABSTRACT: This work presents a machine translation system for converting Spanish text into glosses of Mexican Sign Language (LSM). The LSM gloss serves as an intermediate grammatical representation that reflects the sequence of signs in this language. For the development of the system, a Spanish–LSM bilingual corpus was built using the LSM dictionary of Mexico City, complemented with additional linguistic information and audiovisual resources, and structured in a relational database. Subsequently, using Meta's NLLB model, fine-tuning was performed with this corpus, resulting in three model variants: ES-LSM1, ES-LSM2, and ES-LSM3. The quality of each version was evaluated using the BLEU, ROUGE, and ChrF metrics, showing significant improvements in each iteration, even with a limited amount of data. In particular, the ES-LSM3 version achieved outstanding results with 84% in ROUGE, 75% in ChrF, and up to 65% in BLEU-1, reflecting translations with high lexical accuracy and strong correspondence to the reference sentences. Finally, ES-LSM3 was integrated into a graphical interface that allows the translation of Spanish words into LSM glosses and playing videos that briefly demonstrate the use of a sign for each word or, when unavailable, its fingerspelled form.

KEYWORDS: Deep learning, corpus compilation, LSM gloss, mexican sign language, automatic translation system.

INTRODUCCIÓN

En México, aproximadamente 2.9 millones de personas presentan algún tipo de discapacidad auditiva, de las cuales cerca de 1.3 millones son sordas [1]. Esta cifra subraya la importancia del conocimiento, uso y difusión de la lengua de señas mexicana (LSM), un sistema de comunicación visual con estructura lingüística propia, basado en configuraciones manuales, movimientos,

expresiones faciales y corporales. A pesar de su papel fundamental en la inclusión social de las personas sordas, únicamente el 0.2% de la población mexicana utiliza o comprende la LSM [2], lo que revela una marcada brecha comunicativa entre personas sordas y oyentes.

La LSM fue reconocida como lengua nacional oficial en 2005 y constituye un elemento central del patrimonio lingüístico de la comunidad sorda [3]. Como toda lengua natural, posee una gramática propia, sustentada en una fonología visual que integra tres componentes: la matriz segmental (movimiento y uso de las manos), la articulatoria (configuración, ubicación, dirección y orientación) y los rasgos no manuales (expresiones faciales y posturas) [4, 5].

Un medio para comprender la expresión del significado en LSM es el uso de la glosa, una transcripción de las señas a la sintaxis del español. Aunque la glosa ofrece una representación aproximada del mensaje original, es una herramienta útil en la enseñanza, el análisis lingüístico y la documentación de la LSM, facilitando su estudio y comparación con otras lenguas de señas [5].
En años recientes, se han desarrollado diversos sistemas automáticos para facilitar la comunicación entre personas sordas y oyentes, destacando aquellos basados en visión computacional y aprendizaje automático para el reconocimiento de señas [6-8]. Sin embargo, la mayoría de estos esfuerzos se enfocan en la traducción de la LSM al español, mientras que los trabajos dirigidos a la traducción del español a la LSM han sido escasos.

Entre estos pocos trabajos, destacan los de Pichardo-Laguna et al. [9,10,11], quienes desarrollaron un sistema de traducción directa con base a reglas marcadas. Un trabajo más reciente de ellos considera la sintaxis tanto del español como del LSM [12]. Por otra parte, Hernández-Cruz [13] propone un traductor del español mexicano a la glosa de la LSM, cuyo diseño combina algunos modelos tradicionales, como autómatas y reglas lingüísticas, con una red de memoria a largo plazo (LSTM). Sin embargo, el corpus empleado para el entrenamiento proviene principalmente de traducciones del español a la glosa de la lengua de señas española, lo que introduce un sesgo que podría afectar su aplicabilidad a la LSM. En los últimos años, han surgido enfoques basados en aprendizaje profundo que podrían superar estas limitaciones al aprovechar corpus más extensos y técnicas de modelado del lenguaje, e.g., ver [14]. Un ejemplo reciente es el trabajo de Lara-Ortiz et al. [15], quienes compilaron un corpus de 3,000 pares de frases en español y glosa de LSM, validado con modelos transformadores y alcanzando una efectividad del 94%. No obstante, su corpus presenta una redundancia de estructuras y de vocabulario, lo que podría afectar la generalización de los modelos.

El presente trabajo propone un sistema de traducción automática del español mexicano a la glosa de la LSM. Entre los objetivos de este trabajo destacan tres. En primer lugar, desde el punto de vista científico, se planteó analizar la viabilidad del uso de modelos multilingües de código abierto para abordar tareas de traducción entre lenguas orales y lenguas de señas, considerando los desafíos lingüísticos y estructurales que implica este tipo de procesamiento. En segundo lugar, desde una perspectiva tecnológica, el objetivo fue desarrollar un prototipo funcional basado en modelos de aprendizaje profundo capaz de generar traducciones bidireccionales entre español y glosa de LSM, evaluando su desempeño con un conjunto de validación independiente. Finalmente, desde un enfoque social, se buscó contribuir a la inclusión comunicativa y a la reducción de barreras lingüísticas que enfrenta la comunidad sorda en México, mediante el aprovechamiento de tecnologías accesibles y de libre uso.

En conjunto, el trabajo presenta dos contribuciones principales: (1) el preprocesamiento de un corpus bilingüe LSM-español compuesto por 1,077 pares de frases únicas, cada una con vocabulario distinto, y (2) el desarrollo de tres modelos de traducción ajustados a partir de No Language Left Behind (NLLB) de Meta, un modelo multilingüe de código abierto que ha demostrado un desempeño competitivo en tareas de bajo recurso. Los resultados experimentales indican un desempeño de hasta 69% de precisión en la traducción de glosa de LSM al español, y 68% en la dirección inversa, lo que evidencia la viabilidad técnica y científica del enfoque propuesto, así como su potencial impacto social en el fortalecimiento de la accesibilidad lingüística.

Revisión de la literatura

A la fecha, se han documentado poco más de 50 trabajos en la literatura científica centrados en la traducción automática entre la LSM y el español mexicano. La mayoría de estos estudios abordan el reconocimiento automático de señas, utilizando imágenes y videos en dos o tres dimensiones para capturar la configuración, el movimiento, la orientación y la ubicación de las manos [16-18]. Algunos enfoques han incorporado sensores inerciales para mejorar la precisión en la detección de señas, como en el caso de Varela-Santos et al. [19]. Particularmente, Ríos-Figueroa et al. [16] presentan un compendio de trabajos destacados en esta área, mientras que Mendoza-Tene et al. [6] evalúan la efectividad de estos sistemas en dispositivos móviles.

Por otra parte, la traducción automática en la dirección inversa, del español mexicano a la LSM, ha recibido menor atención. Entre los estudios más relevantes se encuentran los de Pichardo-Lagunas y Martínez-Seis [9,10], quienes propusieron un enfoque basado en reglas lingüísticas manuales para estructurar la LSM a partir del español. Estos autores identificaron que muchas construcciones requieren referencias visuales contextuales, como en el caso de las preposiciones de lugar, para lograr una equivalencia semántica adecuada. Asi mismo,

observaron que, al igual que en otras lenguas, la LSM permite múltiples estructuras sintácticas para expresar una misma idea. Por su parte, Hernández-Cruz [13] desarrolló un sistema de traducción del español mexicano a la glosa de la LSM, combinando autómatas, reglas gramaticales y una red neuronal LSTM. Sin embargo, su corpus de entrenamiento se basó principalmente en traducciones a la lengua de señas española, lo que introduce un sesgo significativo para su aplicabilidad en el contexto mexicano.

En contraste, otras lenguas de señas han mostrado avances importantes. Por ejemplo, Zhao et al. [20] desarrollaron un sistema de traducción de texto a la lengua de señas americana (ASL) utilizando gramáticas de árbol sincrónico. Del mismo modo, D'Armond y Speers [21] emplearon gramáticas léxicas funcionales para representar estructuras del inglés en ASL, integrando además un modelo fonológico basado en el principio de movimiento-retención. También se han propuesto sistemas para otras lenguas de señas, como la española [22], la griega [23] y la árabe [24], entre otras [14].

En años recientes, los avances en aprendizaje profundo, particularmente los modelos de lenguaje de gran escala, han transformado los sistemas de traducción automática [25,26]. Modelos como BERT [27] y sus variantes, entre ellas XLNet [28] y RoBERTa [29], han establecido nuevos estándares en tareas de procesamiento del lenguaje natural. En este sentido, Cate y Hussein [30] exploraron el uso de modelos tipo BERT para la traducción del inglés a ASL con resultados prometedores. De forma complementaria, Stoll et al. [31] propusieron redes generativas adversarias (GAN) para mejorar la generación de señas. Sin embargo, un obstáculo persistente para el desarrollo generalizado de sistemas de traducción automática hacia lenguas de señas sigue siendo la escasez de corpus extensos, balanceados y bien estructurados [32].

MATERIAL Y MÉTODOS

Construcción del Corpus

El corpus utilizado en este estudio se construyó principalmente a partir del Diccionario de la Lengua de Señas Mexicana de la Ciudad de México [4], el cual contiene 977 pares de sentencias con su transcripción en glosa de la LSM y su correspondiente en español. Cada sentencia incorpora una palabra nueva del diccionario, asegurando así una cobertura progresiva del vocabulario. Adicionalmente, se integraron 100 palabras individuales provenientes de otras fuentes, con el objetivo de ampliar la diversidad léxica. En total, el corpus está compuesto por 1,077 registros.

Además de las transcripciones LSM-español, se incluyeron anotaciones lingüísticas detalladas de la LSM, abarcando los siguientes aspectos:

- Tipo de seña: Se clasifican en seña manual (SM), cuando se emplea únicamente la mano dominante; seña bimanual (SB), cuando participan la mano dominante y la mano base; y seña simétrica (SS), cuando ambas manos se usan de forma sincronizada. También se consideran las señas compuestas (SC), integradas por dos o más señas simples que, en conjunto, representan un único concepto. Estas pueden incluir combinaciones de SM, SB o SS.

- Configuración: Hace referencia a la forma que adoptan las manos al realizar la seña. Se seleccionaron configuraciones previamente registradas en el diccionario, así como algunas configuraciones transitivas, es decir, aquellas que cambian de forma durante la ejecución de una misma seña.
- Orientación: Indica la dirección en la que se orienta la palma o el dorso de la mano. Algunas señas presentan orientaciones fijas, mientras que otras implican un cambio de orientación como parte de su significado.
- Ubicación: Corresponde al espacio corporal donde se inicia, desarrolla o finaliza la seña. Por ejemplo, una seña puede comenzar a la altura del pecho y terminar en la frente, o viceversa. La ubicación varía ampliamente entre señas.
- Movimiento: Describe el desplazamiento que realiza una o ambas manos. En algunos casos, una mano permanece estática mientras la otra realiza un movimiento; en otros, ambas manos interactúan dinámicamente.
-Rasgos no manuales: Se documentan elementos como expresiones faciales, movimientos de cabeza, cejas u hombros que complementan o modifican el significado de la seña.
- Representación icónica: En los casos en que la seña simula visualmente una acción, objeto o ser vivo, se incluye una nota de representación para señalar dicha correspondencia.
- Definición: Se anota la definición en español de cada palabra registrada, siguiendo la referencia del diccionario.

Con el fin de complementar el corpus textual, se procuró incorporar material audiovisual de las señas. Aunque no todas las entradas disponen de un video demostrativo, se logró recopilar al menos una representación en video para la mayoría de los registros.

Finalmente, el corpus fue estructurado en una base de dato relacional implementada en MySQL, lo que permite un almacenamiento organizado y eficiente de la información lingüística y visual. La Figura 1 muestra el diagrama entidad-relación de dicha base de datos.

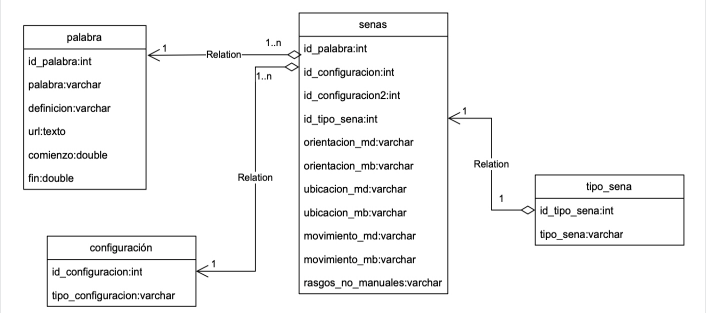


Figura 1: Método propuesto para la clasificación de enfermedades de las hojas de fresa.
Fuente: Elaboración propia.

Entrenamiento de los modelos

Para el entrenamiento del sistema de traducción glosa LSM-español se utilizó el modelo No Language Left Behind (NLLB) desarrollado por Meta. Este modelo se seleccionó sobre otras alternativas (como MarianMT o mBART) por dos razones principales: (1) NLLB está diseñado para abordar la traducción multilingüe de más de 200 idiomas y se ha destacado por una mayor calidad de traducción, en comparación con modelos de arquitecturas codificador-decodificador; y (2) NLLB se destaca por su eficiencia y velocidad en procesos de ajuste fino (fine-tuning), lo que permite adaptar el modelo pre-entrenado con un consumo de recursos computacionales moderado. En particular, en este estudio se empleó una versión optimizada y de menor tamaño (o destilada) del modelo, con un nuevo par de lenguajes: español y glosa de la LSM.

El proceso de entrenamiento se realizó en Google Colab, tanto en su versión gratuita como de paga y constó de tres etapas principales:

1. Preparación del corpus. El corpus se organizó en un archivo CSV con tres columnas: sentencias en español, su correspondiente traducción en glosa LSM, y una indicación del uso de la instancia (como entrenamiento o prueba). Se utilizó el modelo conjunto-validación, considerando 90% para entrenamiento y el resto para pruebas o validación. Se consideró como criterio de división del conjunto-validación la estratificación, asegurando una representación proporcional de la complejidad lingüística en ambos subconjuntos. La estratificación se diseñó bajo dos escenarios con el fin de evaluar la robustez del modelo: (1) un escenario en el que el conjunto de validación compartiera la mayor parte del vocabulario presente en el entrenamiento, permitiendo medir la capacidad de generalización sobre patrones ya observados; y (2) un escenario en el que el conjunto de validación incluyera glosas y estructuras ausentes en el entrenamiento, con el propósito de evaluar la respuesta del modelo ante patrones novedosos. A partir de esta preparación se generaron las distintas versiones del sistema de traducción.

2. Configuración del entorno de entrenamiento. Se añadió un token específico para la glosa LSM al tokenizador del modelo. Este token se inicializó con pesos derivados del español para mejorar la adaptación, evitando así el entrenamiento desde cero y acelerando la convergencia del modelo. Además, se establecieron los hiperparámetros adecuados para el proceso de entrenamiento, en función de la capacidad computacional disponible y el tamaño del corpus. Esta configuración incluyó el tamaño de lote (batch size), número de pasos de calentamiento (warmup steps), longitud máxima de las secuencias y tasa de decaimiento de los pesos (weight decay).

3. Entrenamiento del modelo. El modelo se entrenó utilizando las instancias del corpus. La duración del entrenamiento varió según los recursos asignados (como la capacidad en GPUs) y los hiperparámetros utilizados. El entrenamiento se llevó a cabo en ciclos ajustados a las limitaciones del entorno.

Se construyeron tres modelos de traducción automática, todos ellos versiones del modelo NLLB con diferentes configuraciones. El primer modelo, llamado ES-LSM1, fue entrenado en la versión gratuita de Google Colab, utilizando una GPU T4 de 15 GB. Debido a las limitaciones de hardware, el batch size se restringió a 16. El modelo se entrenó con 927 instancias y alcanzó 19,000 pasos antes de ser interrumpido por el límite de tiempo de cuatro horas impuesto por la plataforma.

El segundo modelo, ES-LSM2, fue entrenado en Google Colab Pro, con acceso a una GPU A100 de 80 GB. Esto permitió aumentar el batch size a 32 y ejecutar 57,000 pasos de entrenamiento, utilizando 977 instancias. El entrenamiento duró aproximadamente seis horas y arrojó mejores resultados en las métricas de evaluación.

Finalmente, para el tercer modelo, ES-LSM3, se amplió el corpus a 1077 instancias, incorporando palabras individuales además de sentencias, con el objetivo de analizar el comportamiento del modelo ante vocabulario previamente aprendido. Se mantuvieron las configuraciones del segundo modelo, permitiendo una comparación directa.

La Tabla 1, muestra los hiperparámetros utilizados en el entrenamiento para los modelos ES-LSM1, ES-LSM2 y ES-LSM3. Para todos los modelos, se estableció una tasa de decaimiento de los pesos del 0.001 y un número de pasos de calentamiento igual a 1000.

Tabla 1. Hiperparámetros para el entrenamiento de los modelos ES-LSM1, ES-LSM2 y ES-LSM3.

	ES-LSM1	ES-LSM2	ES-LSM3
Tamaño de lote	16	32	32
Longitud máxima de las secuencias	128	128	128
Pasos de entrenamiento	19000	57000	57000
Instancias de entrenamiento	927	977	1077

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2 presenta un diagrama de flujo metodológico que sintetiza las fases secuenciales implementadas para el entrenamiento del sistema de traducción glosa LSM-español.

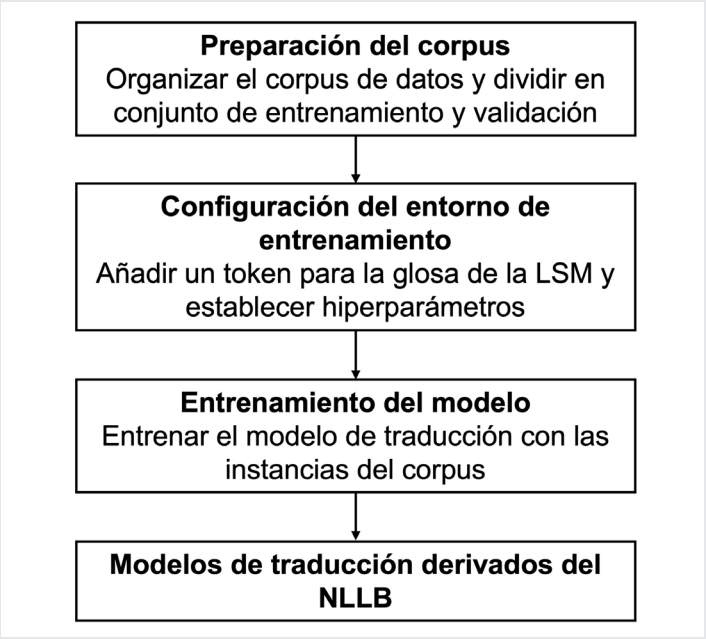


Figura 2: Diagrama de flujo metodológico del proceso de entrenamiento de los sistemas de traducción basados en NLLB. Fuente: Elaboración propia.

Interfaz de lectura de la glosa de la LSM

Se desarrolló una interfaz que, utilizando los modelos de traducción automática presentados en la sección de "Entrenamiento de los modelos", permite recibir un texto en español mexicano y traducirlo a una secuencia de vídeos correspondientes a la LSM (ver Figura 3). Estos vídeos representan de forma directa la glosa LSM generada por el modelo de traducción.

Figura 3. Interfaz del sistema de traducción para convertir texto del español mexicano a vídeos correspondientes en LSM. Fuente: Elaboración propia.

El software implementado consistió en una aplicación de escritorio desarrollada en Python, la cual opera mediante la búsqueda de cada palabra de la oración ingresada dentro de la base de datos de la Figura 1. Si la palabra está registrada, el sistema reproduce el video correspondiente a su seña. En caso de que la palabra no se encuentre en el repositorio, el sistema recurre al deletreo dactilológico, asegurando así la continuidad del mensaje y facilitando la comunicación con personas sordas.

RESULTADOS

Se realizó un estudio experimental con el propósito de comparar el desempeño de los modelos de traducción generados. Una vez completado el proceso de entrenamiento, se evaluó la capacidad de los modelos para traducir en ambos sentidos: del español a la glosa de la LSM y viceversa. La evaluación se llevó a cabo utilizando métricas estándar como BLEU, ROUGE y ChrF, las cuales permiten medir la similitud entre las traducciones generadas y textos de referencia. BLEU se enfoca en coincidencias n-gram para evaluar precisión, ROUGE valora la recuperación de información en resúmenes y traducciones, y ChrF analiza similitud a nivel de caracteres, siendo útil para lenguas morfológicamente complejas. Estas métricas proporcionan una visión integral del rendimiento de los modelos desarrollados.

La Tabla 2, muestra los datos comparativos de los modelos de la traducción del español a la glosa de la LSM considerando todo el vocabulario dentro del corpus. Se observa, en general, una mejora progresiva en el rendimiento de los modelos a través de sus versiones 1, 2 y 3. lo que indica una mejor calidad de traducción en la versión más reciente. En particular, ES-LSM3 obtuvo los puntajes más altos en ROUGE (84%), ChrF (75%) y BLEU-1 a BLEU-4, lo que indica mayor fidelidad, coherencia y precisión en las traducciones.

Tabla 2. Comparación del desempeño de los modelos en la traducción del español a glosa de la LSM, considerando todo el vocabulario disponible en el corpus.

	ES-LSM1	ES-LSM2	ES-LSM3
ROUGE	82%	83%	84%
ChrF	73%	72%	75%
BLEU 1	52%	52%	65%
BLEU 2	38%	36%	50%
BLEU 3	28%	29%	37%
BLEU 4	23%	22%	29%

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 muestra los datos comparativos de los modelos de la traducción del español a la glosa de la LSM considerando solamente parte de vocabulario del cor-

pus. Aquí se observa un comportamiento mixto entre los modelos. ES-LSM1 presenta los valores más altos en ROUGE (83%) y ChrF (69%), lo que indica una mejor similitud entre las sentencias. Sin embargo, ES-LSM3 superó a los otros modelos en las métricas BLEU-2 a BLEU-4, lo que sugiere una mayor precisión en secuencias más largas de palabras.

Tabla 3. Comparación del desempeño de los modelos en la traducción del español a glosa de la LSM, considerando únicamente parte del vocabulario disponible en el corpus.

	ES-LSM1	ES-LSM2	ES-LSM3
ROUGE	83%	81%	74%
ChrF	69%	67%	65%
BLEU 1	68%	71%	69%
BLEU 2	48%	45%	50%
BLEU 3	35%	31%	37%
BLEU 4	25%	22%	29%

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4 muestra los datos comparativos de los modelos de la traducción de la glosa de la LSM al español considerando todo el vocabulario incluido en el corpus. Aquí, los resultados indican una mejora del modelo ES-LSM2 en casi todas las métricas, especialmente en ROUGE (77%), ChrF (65%) y BLEU-1 a BLEU-4. Aunque ES-LSM3 sigue manteniendo un desempeño competitivo, ES-LSM1 muestra el rendimiento más bajo, especialmente en ChrF (39%) y BLEU-1 (32%).}

Tabla 4. Comparación del desempeño de los modelos en la traducción de glosa LSM al español, considerando todo el vocabulario disponible en el corpus.

	ES-LSM1	ES-LSM2	ES-LSM3
ROUGE	69%	77%	76%
ChrF	39%	65%	60%
BLEU 1	32%	60%	50%
BLEU 2	29%	50%	45%
BLEU 3	26%	45%	41%
BLEU 4	22%	35%	36%

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la Tabla 5 presenta los datos comparativos de los modelos de la traducción de la glosa de la LSM al español, considerando solamente parte del vocabulario del corpus. Similar a la Tabla 1, aquí se observa que ES-LSM3 presenta el mejor desempeño general, destacando en todas las métricas evaluadas.

Tabla 5. Comparación del desempeño de los modelos en la traducción de glosa LSM al español, considerando solamente parte del vocabulario disponible en el corpus.

	ES-LSM1	ES-LSM2	ES-LSM3
ROUGE	74%	72%	74%
ChrF	74%	73%	77%
BLEU 1	63%	62%	68%
BLEU 2	54%	52%	61%
BLEU 3	46%	46%	54%
BLEU 4	36%	39%	49%

Fuente: Elaboración propia.

Análisis cuantitativo

Durante la experimentación con las distintas versiones del modelo, se observó una mejora progresiva en el desempeño conforme se aumentaron las instancias de entrenamiento. Las evaluaciones se realizaron en dos escenarios: un conjunto de pruebas con palabras presentes en el corpus original y otro con palabras nuevas no vistas durante el entrenamiento, siendo el porcentaje de palabras en ambos casos prácticamente el mismo. En ambos casos, se utilizaron métricas estándar de traducción automática (BLEU, ROUGE y ChrF) para medir la calidad de las traducciones. Tomando en cuenta los todos los resultados obtenidos por las diferentes métricas, en los dos casos el desempeño promedio del modelo ES-LSM1 es de 49.5%, el del modelo ES-LSM2 de 53.63 % y el modelo ES-LSM3 tiene un promedio de 56.46%.

Los resultados muestran que las versiones sucesivas del modelo (ES-LSM2 y ES-LSM3) superaron consistentemente a la versión inicial (ES-LSM1). En particular, la versión ES-LSM3 destacó en los puntajes BLEU-4 y ChrF, lo cual indica una mayor precisión y fluidez tanto en traducciones conocidas como no vistas. Esto sugiere que el modelo no solo aprende a reproducir las estructuras del corpus, sino que también adquiere capacidad de generalización. Aunque otros trabajos previos a este hayan utilizado las mismas métricas de evaluación de traducción, no sería del todo justo comparar los puntajes como tal, ya que ninguno ha tenido la misma estructura que utilizamos para entrenar y probar los modelos. Pero si se puede afirmar que nuestra glosa es de la más diversa, lo que resultó en un modelo más adaptable a diferentes traducciones.

Al integrar este modelo con la interfaz de usuario, se logró una herramienta funcional que permite traducir sentencias en español a glosa LSM y reproducir automáticamente los videos correspondientes a cada seña. Estos avances reflejan tanto la viabilidad técnica como el potencial social del sistema desarrollado.

Análisis cualitativo

El modelo ES-LSM1 incluyó varias predicciones acertadas y otras menos precisas, aunque cercanas al mensaje original. De este modelo, ciertas predicciones resultaron más intrigantes que otras, por lo que se requirió una revisión particular de aquellas más alejadas del mensaje esperado, para determinar las causas de dichas variaciones.

Por ejemplo, para la oración "Mi familia siempre dona a Teletón", la traducción esperada es: "SIEMPRE MI FAMILIA TELETÓN DONAR"", pero la predicción final resultó: "SIEMPRE MI FAMILIA DONAR TELETÓN". Aunque el modelo fue capaz de identificar y traducir correctamente los lexemas (palabras individuales), tendió a reproducir la estructura canónica Sujeto-Verbo-Objeto (SVO) del español, en lugar de adoptar las estructuras propias de la LSM, las cuales a menudo priorizan el tópico o emplean órdenes como Tiempo-Sujeto-Objeto-Verbo (T-S-O-V).

También se detectaron casos en los que la traducción no fue correcta, especialmente en ciertas palabras. Por ejemplo, para la oración "Mi viaje a Francia me emocionó", la traducción correcta sería: "YO VIAJE FRANCIA YO EMOCIONAR YA""; sin embargo, la predicción del modelo fue: "MI VIAJE FRANCIA YO EMUCIONAR". Aquí se observa que las palabras ausentes en el conjunto de entrenamiento no son traducidas adecuadamente, debido a la falta de referencias suficientes para el modelo. Por lo tanto, se determinó que el modelo requería un mayor volumen de información para su entrenamiento, lo que motivó la creación de los modelos ES-LSM2 y ES-LSM3.

La Tabla 6 muestra algunas traducciones del modelo ES-LSM2, donde se evidencia una clara mejoría respecto al modelo ES-LSM1, aunque todavía persisten problemas relacionados con la morfología y la concordancia. El modelo luchó por integrar y predecir correctamente los elementos gramaticales que marcan la persona, como los pronombres clíticos y las señales de direccionalidad inherentes a la LSM.

Tabla 6. Ejemplos comparativos de traducciones generadas por el modelo ES-LSM2, mostrando la calidad de salida frente a las referencias del corpus

Palabra en español	Traducción LSM original	Predicción LSM modelo
Te ayudo	AYUDAR	yo-AYUDAR-a-
Le dije a Juan	DECIR JUAN	JUAN YO DEC
Felipe es inteligente	FELIPE INTELIGENTE	FELIPE INTELIGENTE
Gordísimo	GORDO MUCHO	GordisIMO
Había dos bicicletas	BICICLETAS DOS	HAY BICICLETAS HABER

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 7 muestra los resultados de traducción del modelo ES-LSM3. Aquí, el modelo mostró una capacidad mejorada para generalizar y manejar vocabulario desconocido, demostrando un progreso en la inferencia léxica (e.g., intentando traducir palabras no vistas, aunque con errores como "MATINAR" por "MATAR"). Al igual que en los otros modelos, se evidencia la necesidad de un mayor volumen de datos para un entrenamiento más robusto y de alta calidad para abordar estas variaciones y mejorar la precisión tanto léxica como sintáctica.

Tabla 7. Ejemplos comparativos de traducciones generadas por el modelo ES-LSM3, mostrando la calidad de salida frente a las referencias del corpus.

Palabra en español	Traducción LSM original	Predicción LSM modelo
Visité CDMX	YO YA VISITAR CDMX	CDMX YO VISITAR
No hay agua	AGUA NO-HAY	AGUA NO-HAY
Pepe no comió	PEPE NO COMER	PEPÉ NO COM
Pedro mató a Juan	PEDRO MATAR JUAN	JUAN PE MATINAR
Mi hijo es maestro	MI HIJO ÉL MAESTRO	MI HIJO MAES

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se desarrolla un sistema de traducción automática de texto en español a glosa de la LSM, con reproducción audiovisual de las señas. Para ello, se construye un corpus bilingüe a partir del diccionario de LSM de la Ciudad de México, enriquecido con información lingüística y representación audiovisual, y organizado en una base de datos relacional. Se proponen tres versiones derivadas del modelo NLLB de Meta, que demuestran mejoras progresivas en el desempeño conforme el incremento de las instancias de entrenamiento. Las métricas de evaluación (BLEU, ROUGE y ChrF) reflejan una mayor calidad de traducción en la versión ES-LSM3, que exhibe una mejor capacidad de generalización, incluso con datos no vistos durante el entrenamiento.

En general, los resultados obtenidos son alentadores, especialmente considerando la limitada cantidad de datos disponibles. Si bien los modelos de traducción automática suelen requerir decenas de miles de sentencias para lograr buenos desempeños, los modelos generados permiten una versión funcional de traducción. Se espera que estos avances representen un paso hacia el fortalecimiento de la educación inclusiva y la accesibilidad tecnológica, al facilitar herramientas que contribuyan a reducir barreras comunicativas para la comunidad usuaria de la LSM.

Como trabajo futuro, se priorizará la expansión del corpus con aportaciones de expertos y usuarios. Fundamentalmente, se realizará una validación con personas sordas e intérpretes de LSM para evaluar la comprensión semántica y la naturalidad de las traducciones producidas por el modelo. Asimismo, se plantea como línea alternativa de investigación el uso de técnicas de minería de patrones frecuentes y reglas de asociación para identificar nuevas reglas de traducción que complementen los modelos propuestos y contribuyan a mejorar la calidad de las traducciones.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue financiada parcialmente por el Tecnológico Nacional de México (TecNM) a través del proyecto 23018.25-P, bajo la dirección del Dr. Fajardo-Delgado. Asimismo, el Dr. Molinar-Solis agradece al TecNM por su apoyo para la realización de su Año Sabático bajo el Programa de Investigación Científica, Tecnológica o Educativa (No. de autorización AS-1-043/2025). Además, los autores agradecen el apoyo técnico de Abril Carolina Díaz Magaña.

BIBLIOGRAFÍA

[[1] INEGI (2020). Población con discapacidad o limitación en la actividad cotidiana por entidad federativa y tipo de actividad realiza según sexo, 2020. https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/interactivos/?pxq=Discapacidad_Discapacidad_02_2c111b6a-6152-40ce-bd39-6fab2c4908e3&idrt=151&opc=t.

[2] Cámara de Diputados (2021). Aprueban reformas para que personas con discapacidad auditiva reciban educación bilingüe en lengua de señas. Boletín No.5854 de la Cámara de Diputados del Congreso de la Unión de México.

[3] Diario Oficial de la Federación (2005). Ley general de las personas con discapacidad, publicada el 10 de Junio de 2005, modificada el 1 de Agosto de 2008 y abrogada el 30 de Mayo de 2011. Diario Oficial de la Federación, Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2044351&fecha=10/06/2005#gsc.tab=0.

[4] GobCDMX (2017). Diccionario de lengua de señas mexicana de la Ciudad de México. https://pdh.cdmx.gob.mx/storage/app/media/banner/Dic_LSM2.pdf. INDEPEDI. Ciudad de México.

[5] Cruz-Aldrete, M. (2008). Gramática de la lengua de señas mexicana. Tesis de doctorado. El Colegio de México.

[6] Mendoza-Tene (2025). Desarrollo de un sistema automático de reconocimiento de la LSM para dispositivos móviles. Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica. 12(72), 1-23. https://riiit.com.mx/apps/site/files_v2450/lsm_jal_1_riiit_ene-feb_2025.pdf.

[7] García-Gil, G., López-Armas, G. D. C., Sánchez-Escobar, J. J., Salazar-Torres, B. A., & Rodríguez-Vázquez, A. N. (2024). Real-Time Machine Learning for Accurate Mexican Sign Language Identification: A Distal Phalanges Approach. Technologies, 12(9), 152. DOI: 10.3390/technologies12090152.

[8] Trujillo-Romero, F., & García-Bautista, G. (2023). Mexican Sign Language corpus: Towards an automatic translator. ACM Transactions on Asian and Low-Resource Language Information Processing, 22(8), 1-24. DOI: 10.1145/3591471.

[9] Pichardo-Lagunas, O., & Martínez-Seis, B. C. (2015). Resource Creation for Automatic Translation System from Texts in Spanish into Mexican Sign Language. Res. Comput. Sci., 100, 129-137.

[10] Pichardo-Lagunas, O., Partida-Terrón, L., Martínez-Seis, B., Alvear-Gallegos, A., & Serrano-Olea, R. (2016). Sistema de traducción directa de español a LSM con reglas marcadas. Res. Comput. Sci., 115, 29-41.

[11] Pichardo-Lagunas, O., Martínez-Seis, B., Ponce-de-León-Chávez, A., Pegueros-Denis, C., Muñoz-Guerrero, R. (2017). Linguistic Restrictions in Automatic Translation from Written Spanish to Mexican Sign Language. In: Sidorov, G., Herrera-Alcántara, O. (eds) Advances in Computational Intelligence. MICAI 2016. Lecture Notes in Computer Science(), vol 10061. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-62434-1_8.

[12] Martinez-Seis, B., Pichardo-Lagunas, O., Hernández-Morales, E., Rivera-Rodríguez, O., & Miranda, S. (2025). Automatic Translation of Sentences to Mexican Sign Language: Rule-based Machine Translation and Animation Synthesis in Avatar. Computación y Sistemas, 29(1), 145-155.

[13] Hernández-Cruz, J. (2019). Traducción de Texto en Español a Texto LSM Usando Aprendizaje Profundo. Tesis de maestría. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Hermosillo.

[14] Farooq, U., Rahim, M. S. M., Sabir, N., Hussain, A., & Abid, A. (2021). Advances in machine translation for sign language: approaches, limitations, and challenges. Neural Computing and Applications, 33(21), 14357-14399. DOI: 10.1007/s00521-021-06079-3.

[15] Lara-Ortiz, V., Fuentes-Aguilar, R. Q., & Chairez, I. (2025). Spanish to Mexican Sign Language

glosses corpus for natural language processing tasks. Scientific Data, 12(1), 702.

[16] Ríos-Figueroa, H. V., Sánchez-García, A. J., Sosa-Jiménez, C. O., y Solís-González-Cosío, A. L. (2022). Use of spherical and cartesian features for learning and recognition of the static mexican sign language alphabet. Mathematics, 10(16), 2904. DOI: 10.3390/math10162904.

[17] Rodríguez, R. F., Rosas, F. J. P., Zuñiga-Madrid, L. Á., & Arguijo, P. (2021). Reconocimiento de las señas estáticas del LSM con características basadas en aprendizaje profundo. Research in Computing Science, 150(6), pp. 303–311.

[18] Fregoso, J., Gonzalez, C. I., & Martinez, G. E. (2021). Optimization of convolutional neural networks architectures using PSO for sign language recognition. Axioms, 10(3), 139. DOI: 10.3390/axioms10030139.

[19] Varela-Santos, Héctor, Morales-Jiménez, Anahí, Córdova-Esparza, Diana-Margarita, Terven, Juan, Mirelez-Delgado, Flabio Darío, & Orenday-Delgado, Adán. (2021). Assistive Device for the Translation from Mexican Sign Language to Verbal Language. Computación y Sistemas, 25(3), 451-464. DOI: 10.13053/cys-25-3-3459.

[20] Zhao, L., Kipper, K., Schuler, W., Vogler, C., Badler, N., & Palmer, M. (2000). A machine translation system from English to American Sign Language. In Envisioning Machine Translation in the Information Future: 4th Conference of the Association for Machine Translation in the Americas, AMTA 2000 Cuernavaca, Mexico, October 10–14, 2000 Proceedings 4 (pp. 54-67). Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/3-540-39965-8_6.

[21] d'Armond, L. S., & Speers, M. S. (2002). Representation of American sign language for machine translation (Doctoral dissertation, Georgetown University).

[22] Porta, J., López-Colino, F., Tejedor, J., & Colás, J. (2014). A rule-based translation from written Spanish to Spanish Sign Language glosses. Computer Speech & Language, 28(3), 788-811. DOI: 10.1016/j.csl.2013.10.003

[23] Kouremenos, D., Ntalianis, K., & Kollias, S. (2018). A novel rule based machine translation scheme from Greek to Greek Sign Language: Production of different types of large corpora and Language Models evaluation. Computer Speech & Language, 51, 110-135. DOI: 10.1016/j.csl.2018.04.001.

[24] Luqman, H., & Mahmoud, S. A. (2019). Automatic translation of Arabic text-to-Arabic sign language. Universal Access in the Information Society, 18(4), 939-951. DOI: 10.1007/s10209-018-0622-8.

[25] Brants, T., Popat, A., Xu, P., Och, F. J., & Dean, J. (2007, June). Large language models in machine translation. In Proceedings of the 2007 Joint Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and Computational Natural Language Learning (EMNLP-CoNLL) (pp. 858-867). https://aclanthology.org/D07-1090.pdf.

[26] Zhang, B., Haddow, B., & Birch, A. (2023). Prompting large language model for machine translation: A case study. In International Conference on Machine Learning (pp. 41092-41110). PMLR.

[27] Devlin, J. (2019). Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. arXiv preprint arXiv:1810.04805.

[28] Yang, Z. (2019). XLNet: Generalized Autoregressive Pretraining for Language Understanding. arXiv preprint arXiv:1906.08237.

[29] Liu, Y. (2019). Roberta: A robustly optimized bert pretraining approach. arXiv preprint arXiv:1907.11692, 364.

[30] Cate, H., & Hussain, Z. (2017). Bidirectional american sign language to english translation. arXiv preprint arXiv:1701.02795.

[31] Stoll, S., Camgoz, N. C., Hadfield, S., & Bowden, R. (2020). Text2Sign: towards sign language production using neural machine translation and generative adversarial networks. International Journal of Computer Vision, 128(4), 891-908. DOI: 10.1007/s11263-019-01281-2.

[32] Bragg, D., Koller, O., Bellard, M., Berke, L., Boudreault, P., Braffort, A., Caselli, N., Huenerfauth, M., Kacorri, H., Verhoef, T., Vogler, C., & Ringel Morris, M. (2019, October). Sign language recognition, generation, and translation: An interdisciplinary perspective. In Proceedings of the 21st International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (pp. 16-31). DOI: 10.1145/3308561.3353774.

Ciencias de la Computación

Ingeniantes

Monitorización IoT de Temperatura y Humedad en Agricultura Inteligente mediante Sistema Web Responsivo

Colaboración
Armando Roman Gallardo, Jose Roman Herrera Morales, Sara Sandoval Carrillo and Armando Román Gallardo Heredia, Universidad de Colima

Fecha de recepción: 21 de noviembre de 2025
Fecha de aceptación: 21 de noviembre de 2025

RESUMEN: La agricultura enfrenta desafíos crecientes relacionados con el cambio climático y la optimización de recursos. Este trabajo presenta el diseño, implementación y validación de un prototipo de sistema web responsivo para monitorización en tiempo real de temperatura y humedad en entornos agrícolas mediante IoT. La metodología incluyó desarrollo iterativo integrando sensores DHT22 conectados a microcontroladores ESP32, transmitiendo datos a través de WebSockets a una aplicación web desarrollada con React.js y Tailwind CSS. La validación mediante pruebas funcionales en laboratorio durante 72 horas continuas demostró visualización en tiempo real con latencia inferior a 2 segundos, configuración personalizada por cultivo, generación de alertas cuando los parámetros exceden rangos óptimos y almacenamiento de más de 1,000 mediciones sin pérdidas mediante SQLite. El sistema evidenció recuperación automática ante desconexiones simuladas con 95% de éxito y tiempo promedio de reconexión de 12 segundos. Este prototipo contribuye como fundamento tecnológico para la toma de decisiones agrícolas informadas, facilitando el monitoreo continuo de condiciones ambientales críticas en implementaciones escalables.

PALABRAS CLAVE: Agricultura inteligente, Internet de las Cosas, Monitorización en tiempo real, Sistema responsivo, WebSockets.

ABSTRACT: Agriculture faces growing challenges related to climate change and resource optimization. This work presents the design, implementation and validation of a responsive web system prototype for real-time monitoring of temperature and humidity in agricultural environments through IoT. The methodology included iterative development integrating DHT22 sensors connected to ESP32 microcontrollers, transmitting data through WebSockets to a web application developed with React.js and Tailwind CSS. Validation through functional testing in laboratory for 72 continuous hours demonstrated real-time visualization with latency less than 2 seconds, personalized configuration per crop, alert generation when parameters exceed optimal ranges and storage of more than 1,000 measurements without losses using SQLite. The system evidenced automatic recovery from simulated disconnections with 95% success rate and average reconnection time of 12 seconds. This prototype contributes as technological foundation for informed agricultural decision-making, facilitating continuous monitoring of critical environmental conditions in scalable implementations.

KEYWORDS: Smart agriculture, Internet of Things, Real-time monitoring, Responsive system, WebSockets.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda global de alimentos, sumada a los desafíos del cambio climático y la escasez de recursos, ha impulsado la adopción de tecnologías avanzadas en el sector agrícola. En este contexto, la agricultura inteligente, respaldada por el Internet de las Cosas (IoT), surge como una estrategia clave para optimizar la producción mediante el monitoreo de variables ambientales críticas como la temperatura y la humedad [1,2]. Estas variables son factores determinantes en el crecimiento y desarrollo de los cultivos, ya que variaciones fuera de los rangos óptimos pueden afectar negativamente la fotosíntesis, la absorción de nutrientes y la resistencia a enfermedades, reduciendo la productividad agrícola [3,4].

La integración de sensores IoT en la agricultura permite recopilar datos en tiempo real sobre temperatura y humedad, facilitando decisiones informadas y oportunas [5]. Los agricultores pueden monitorear remotamente las condiciones ambientales y realizar ajustes inmediatos, mejorando el rendimiento de los cultivos y minimizando pérdidas. El desarrollo de aplicaciones web responsivas proporciona una plataforma intuitiva para visualizar y analizar los datos recopilados, siendo accesibles desde múltiples dispositivos y facilitando intervenciones oportunas [6]. El término “responsivo” se refiere al diseño de interfaces web que se adaptan automáticamente a diferentes resoluciones de pantalla y dispositivos.

El monitoreo en tiempo real incrementa la eficiencia de las operaciones agrícolas y disminuye los riesgos asociados a eventos climáticos extremos, ya que detectar tempranamente anomalías ambientales permite implementar medidas preventivas o correctivas, evitando daños considerables [4]. Estas herramientas contribuyen a una agricultura más precisa y eficiente, permitiendo el uso racional de recursos y promoviendo prácticas resilientes al cambio climático.

Con base en las limitaciones identificadas en sistemas previos de monitoreo agrícola, este trabajo plantea la siguiente hipótesis: la integración de sensores IoT de bajo costo (DHT22 y ESP32) con una arquitectura web responsiva basada en comunicación WebSocket permitirá desarrollar un sistema de monitorización en tiempo real de temperatura y humedad que sea funcionalmente viable, accesible desde múltiples dispositivos, con mínima latencia y capaz de recuperarse automáticamente ante interrupciones de conectividad, superando las limitaciones de responsividad, configuración personalizada y robustez reportadas en la literatura previa.

Por lo tanto, este trabajo presenta el desarrollo y validación funcional de un prototipo de aplicación web responsiva para verificar dicha hipótesis mediante el monitoreo en tiempo real de temperatura y humedad aplicables en entornos agrícolas. El sistema contribuye como fundamento tecnológico para la toma de decisiones basada en datos ambientales, facilitando procesos como la planificación del riego y el monitoreo de condiciones críticas en implementaciones escalables.

Revisión de literatura

La integración del Internet de las Cosas (IoT) en la agricultura ha transformado las prácticas tradicionales al permitir la monitorización precisa de variables ambientales esenciales como temperatura y humedad. Diversos estudios demuestran su efectividad para recopilar datos en tiempo real, optimizar la toma de decisiones y mejorar la eficiencia productiva [7,5], aunque con limitaciones específicas que requieren atención.

Muthmainnah et al. [8] desarrollaron un sistema de monitoreo de temperatura y humedad del suelo utilizando sensores DHT11 y YL69 conectados a un microcontrolador ESP8266, logrando una precisión promedio del 99.19% en temperatura y 97.95% en humedad. No obstante, su implementación se centró en invernaderos, sin considerar los desafíos de conectividad en zonas rurales abiertas, además de presentar limitaciones en la interfaz de usuario y accesibilidad desde dispositivos móviles.

Ikram et al. [9] desarrollaron sensores flexibles para monitorización de plantas, destacando su valor para monitorear microclimas. Sin embargo, identificaron desafíos relacionados con la durabilidad y el costo de implementación en gran escala, requiriendo mayor inversión inicial y presentando complejidad técnica que limita su adopción en pequeñas explotaciones agrícolas.

Rajak et al. [10] implementaron una plataforma IoT para agricultura inteligente basada en computación en el borde y la nube, demostrando la eficacia de las plataformas web para visualización de datos. Sin embargo, identificaron limitaciones en la responsividad de la interfaz y gestión de múltiples usuarios simultáneos. Estos enfoques suelen requerir infraestructuras complejas en la nube, inviables en regiones rurales con conectividad limitada y baja alfabetización digital.

Zamora-Izquierdo et al. [11] identificaron problemas relacionados con la conectividad en áreas rurales, la gestión de grandes volúmenes de datos y la necesidad de formación técnica para los agricultores. Muchos sistemas existentes carecen de interfaces intuitivas y configuración personalizada según tipos de cultivo. Los trabajos revisados no abordan concretamente cómo superar barreras críticas como la recuperación frente a pérdidas de conexión, el

despliegue rápido por personal no especializado o la integración de configuraciones específicas para distintos cultivos.

Considerando lo anterior, se identifica que los sistemas previos carecen de interfaces web verdaderamente responsivas que se adapten eficientemente a múltiples dispositivos, configuración personalizada simple para diferentes cultivos, y sistemas de alertas en tiempo real con baja latencia. Por lo cual se propone el presente trabajo para abordar estas limitaciones mediante el desarrollo de un prototipo de sistema web responsivo con comunicación WebSocket y configuración adaptable por cultivo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Recursos materiales

Para la elaboración del prototipo de aplicación web responsiva, se integraron componentes de hardware, software e infraestructura tecnológica que, en conjunto, permiten el monitoreo y graficado en tiempo real de datos de temperatura y humedad en entornos agrícolas.

Hardware

Se empleó el sensor DHT22 para la medición precisa de temperatura y humedad, conectado a un microcontrolador ESP32 con capacidad de procesamiento y conectividad Wi-Fi para transmisión de datos en tiempo real. Para el desarrollo y pruebas se utilizó una computadora con 16 GB de RAM, disco SSD de 1TB y procesador Intel i7 de novena generación.

Software

El desarrollo de la interfaz web responsiva se realizó con React.js y Tailwind CSS para interfaces dinámicas, mientras que el backend se construyó con Node.js y Express.js para gestión de solicitudes y comunicación en tiempo real mediante WebSockets. Para almacenamiento de datos se optó por SQLite, una base de datos ligera adecuada para gestión eficiente sin complejidad de sistemas robustos.

Infraestructura Tecnológica

La infraestructura se basa en un servidor Node.js que utiliza WebSockets para comunicación bidireccional en tiempo real entre cliente y servidor, asegurando actualización constante de datos de temperatura y humedad.

Metodología

La aplicación se desarrolló mediante un enfoque iterativo y flexible que permitió controlar y mejorar progresivamente cada etapa del proyecto. Se definieron siete iteraciones, comenzando con el análisis de requerimientos y planificación, seguido por la configuración del entorno y el prototipado de la interfaz. Posteriormente, se desarrollaron los servicios backend y la base de datos, se integró el hardware con WebSocket para monitoreo en tiempo real, se validaron las funcionalidades, se desarrolló la interfaz web responsiva con React y Tailwind CSS, y finalmente se realizó la fase de pruebas funcionales e implementación.

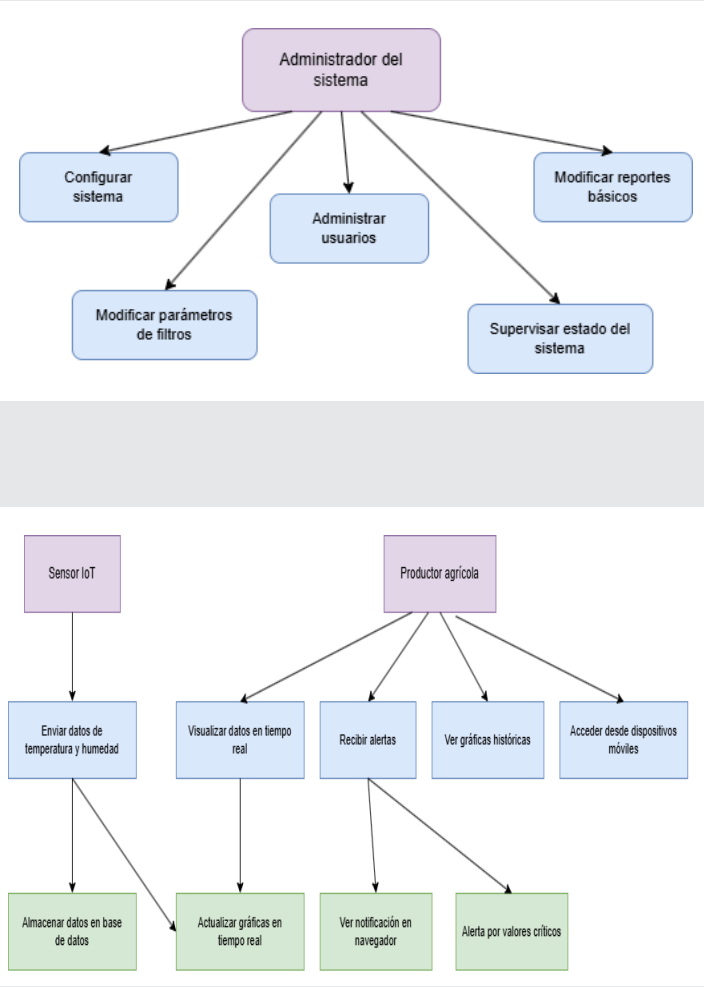


Figura 1: Diagrama de arriba hacia abajo (graph TD). Fuente: elaboración propia.

Durante la primera fase se definieron los objetivos funcionales del sistema, como el monitoreo en tiempo real de temperatura y humedad desde un ESP32, identificando los roles, usuarios y necesidades técnicas. También se seleccionaron las tecnologías base: React.js, WebSocket, Node.js, y un ESP32 con sensor DHT. La configuración del entorno incluyó la preparación del ambiente de desarrollo con Vite, React y Tailwind CSS, implementando los primeros bocetos funcionales de la interfaz gráfica para el administrador del sistema y configurando las dependencias para la comunicación con la API y WebSocket.

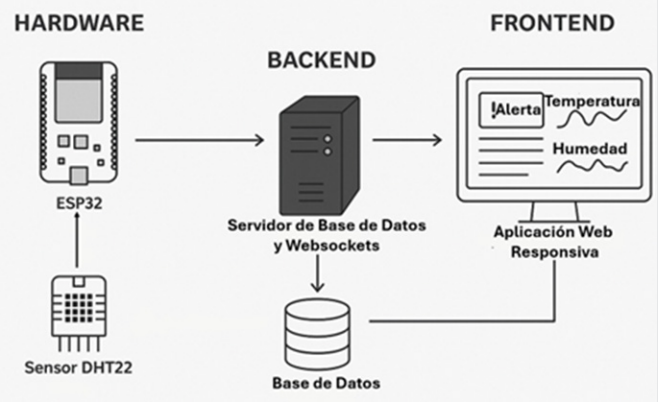


Figura 2: Diagrama general del sistema (hardware + backend + frontend).
Fuente: elaboración propia.

El desarrollo de la base de datos y creación de la API involucró la estructuración de un modelo de datos para almacenar las lecturas enviadas desde el ESP32, junto con la configuración del servidor con Node.js y las rutas API para recibir, almacenar y exponer los datos a la interfaz.

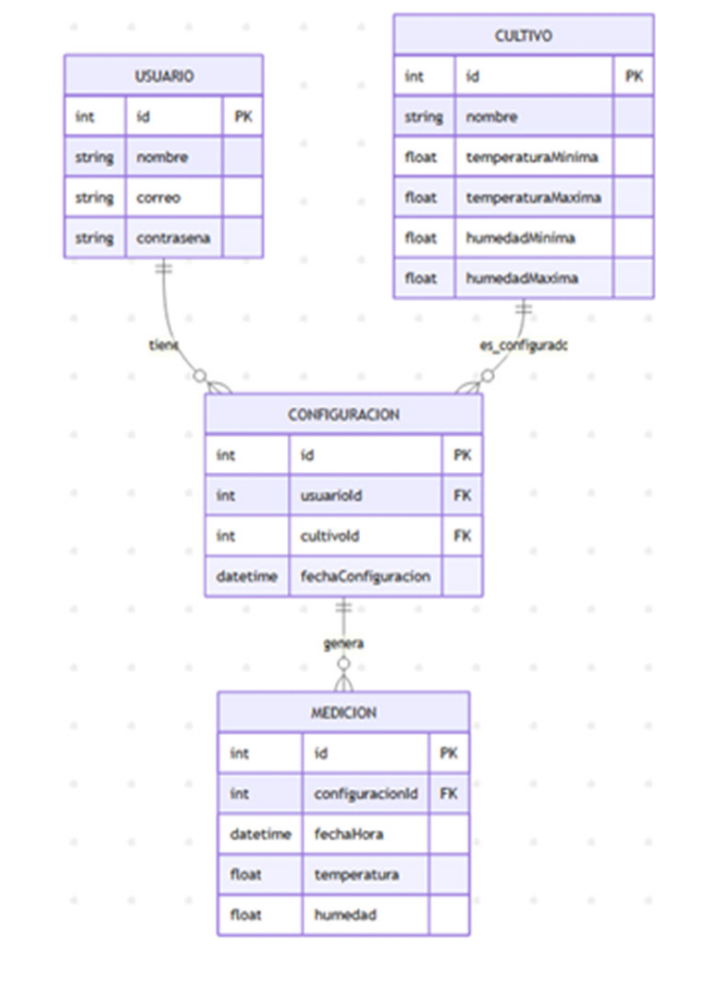


Figura 3: Diagrama entidad-relación del modelo de datos.
Fuente: elaboración propia.

La integración del hardware incluyó la configuración del ESP32 para capturar lecturas del sensor DHT y enviarlas por WebSocket al servidor, implementando un canal WebSocket en el backend para recibir estas lecturas en tiempo real e integrarlas dinámicamente en la interfaz. El escenario de pruebas se realizó en ambiente de laboratorio controlado, con el ESP32 ubicado a una distancia de 2 metros del servidor, utilizando comunicación Wi-Fi en red local.

Las fases posteriores incluyeron la validación de funcionalidades críticas como la visualización dinámica de los datos y las notificaciones ante valores fuera de rango, validando la recepción de eventos en tiempo real y realizando ajustes en la sincronización con la base de datos. Se finalizó el desarrollo de la interfaz gráfica con React.js y Tailwind CSS, garantizando que la página web fuera responsiva para su visualización en distintos dispositivos y realizando pruebas funcionales y de usabilidad en móviles, tabletas y pc de escritorio. La fase final incluyó únicamente pruebas funcionales del sistema, preparando el entorno de despliegue con instrucciones de instalación y asegurando la conexión entre el ESP32, el servidor y la interfaz.

Validación funcional del prototipo

La validación del sistema se centró en la realización de pruebas funcionales automatizadas. Para verificar el comportamiento del sistema ante posibles anomalías o fallas de conectividad, transporte y persistencia de datos, se implementó un componente de software con Node.js (simulador automatizado) que permitió generar datos de temperatura y humedad en tiempo real, conforme a los rangos configurados para distintos cultivos.

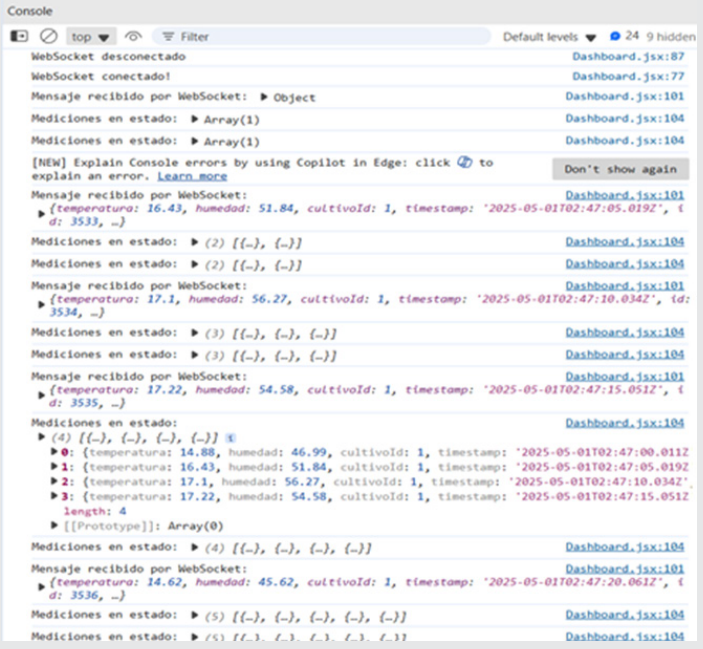


Figura 4: captura de consola WebSocket donde se aprecian los datos que se van recibiendo y enviando.
Fuente: elaboración propia.

Esta herramienta automatizada enviaba datos cada 5 segundos a través de WebSockets, e introdujo de manera sistemática desviaciones entre un 5% al 10% a los valores cada 20 segundos, simulando el registro de valores anómalos de forma controlada y repetible.

Este simulador no solo facilitó la generación continua de datos, sino que también permitió registrar los eventos de envío y recepción, con marcas de tiempo para cada operación. De esta manera, se pudo identificar una latencia promedio inferior a 2 segundos entre la emisión de un dato y su visualización en el dashboard, bajo condiciones de red local en laboratorio.

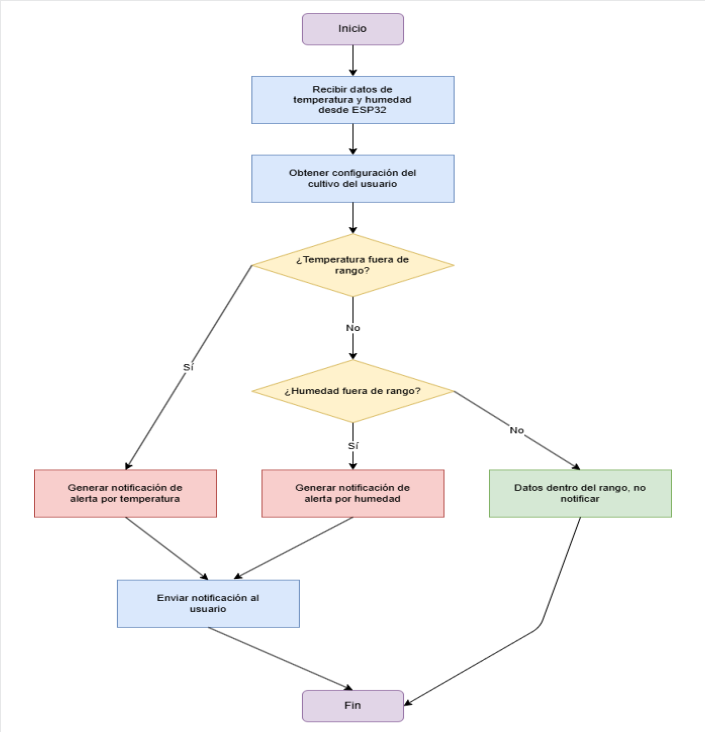


Figura 5: Diagrama de flujo del proceso de validación de rangos de cultivos y generación de alertas.
Fuente: elaboración propia.

Asimismo, se validó la recuperación automática del sistema tras interrupciones de red simuladas, demostrando que el microcontrolador ESP32 podía reconectarse y reanudar el envío sin pérdida de datos.

Es importante destacar que estas pruebas se realizaron en un entorno de laboratorio, con un solo sensor y sin interferencias externas ni distancias reales entre los dispositivos ESP32 y sensor con respecto al servidor NodeJS como pudieran estar en un escenario real de campo, por lo que los resultados deben considerarse válidos únicamente en este contexto.

Para asegurar la aplicabilidad del sistema en entornos rurales reales, se requerirá una fase posterior de pruebas en campo con múltiples dispositivos, redes inestables y condiciones ambientales complejas. No obstante, el uso del simulador automatizado proporciona un fundamento técnico para justificar las métricas funcionales reportadas.

Entorno de pruebas

Las pruebas del sistema se realizaron en un entorno cerrado controlado de laboratorio para garantizar condiciones reproducibles y permitir la validación sistemática de las funcionalidades. Un entorno cerrado se caracteriza por el control total de variables ambientales, eliminación de interferencias externas y condiciones climáticas estables, lo que permite aislar el desempeño del sistema de factores externos impredecibles. Durante 72 horas continuas se registraron mediciones cada 30 segundos, logrando más de 1,000 registros sin pérdidas, con tiempos de respuesta inferiores a 2 segundos y recuperación automática tras desconexiones simuladas de 5, 15 y 30 minutos. Esta metodología controlada proporciona un fundamento para optimizar el funcionamiento antes de implementaciones en campo abierto.

El escenario experimental se configuró en el Laboratorio de Aplicaciones Multimedia de la Facultad de Telemática de la Universidad de Colima, utilizando un área de pruebas de 3m x 8m con temperatura ambiente controlado entre 18°C y 35°C, humedad relativa controlada entre 30% y 80%, y conectividad Wi-Fi estable (802.11n, 2.4 GHz).

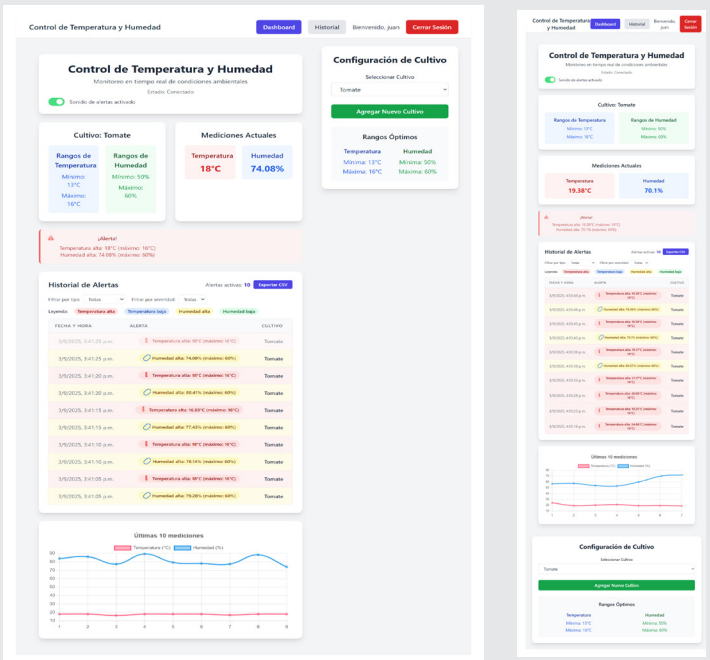


Figura 6: Captura comparativa de la vista móvil y de escritorio del sistema.
Fuente: elaboración propia.

La configuración del hardware incluyó un dispositivo ESP32 con sensor DHT22 ubicado en el centro del área de pruebas a 1.5m de altura, alimentado por fuente estabilizada de 5V DC, con distancia al router Wi-Fi de 5 metros con línea de vista directa y servidor eje-

cutándose en una computadora dentro del laboratorio conectada a la misma red Wi-Fi.

Las condiciones de prueba incluyeron una duración total de 72 horas continuas, frecuencia de medición cada 30 segundos, simulación de variaciones ambientales mediante sistema de climatización, y pruebas de desconexión mediante desactivación manual de Wi-Fi por períodos de 5, 15 y 30 minutos.

RESULTADOS

Autenticación y gestión de usuarios

El prototipo permite a nuevos usuarios registrarse y a usuarios existentes autenticarse correctamente, validando campos obligatorios y evitando duplicidad de nombres de usuario. La gestión de sesiones asegura que cada usuario acceda a su configuración personalizada de cultivo.

Configuración personalizada del cultivo

Cada usuario puede seleccionar o agregar cultivos con sus rangos óptimos de temperatura y humedad basados en referencias técnicas especializadas. Esta configuración se almacena y asocia con el usuario para adaptar las alertas y visualizaciones. Durante las pruebas se implementaron configuraciones específicas para diferentes cultivos mexicanos. Por ejemplo, el tomate presenta rangos óptimos de temperatura diurna de 21-27°C y humedad relativa de 60-80% [12], mientras que la lechuga requiere temperaturas de 22-25°C durante períodos de luz y humedad relativa entre 70-80% [13]. En contraste, cultivos como papaya o caña de azúcar toleran temperaturas más altas, pero requieren altos niveles de humedad para mantener la producción adecuada. Contando con datos de referencia apropiados para los cultivos se podrán calibrar alertas automáticas que detecten con precisión cuándo las condiciones registradas puedan comprometer la salud del cultivo.

Figura 7: Panel de configuración de cultivos para ingresar los con rangos óptimos de referencia.
Fuente: elaboración propia.

Monitoreo en tiempo real y visualización

El dashboard muestra la última medición recibida, con temperatura y humedad, y una gráfica de líneas con los últimos 10 valores. La interfaz es responsiva, accesible desde computadoras, tablets y móviles, gracias a React.js y Tailwind CSS.

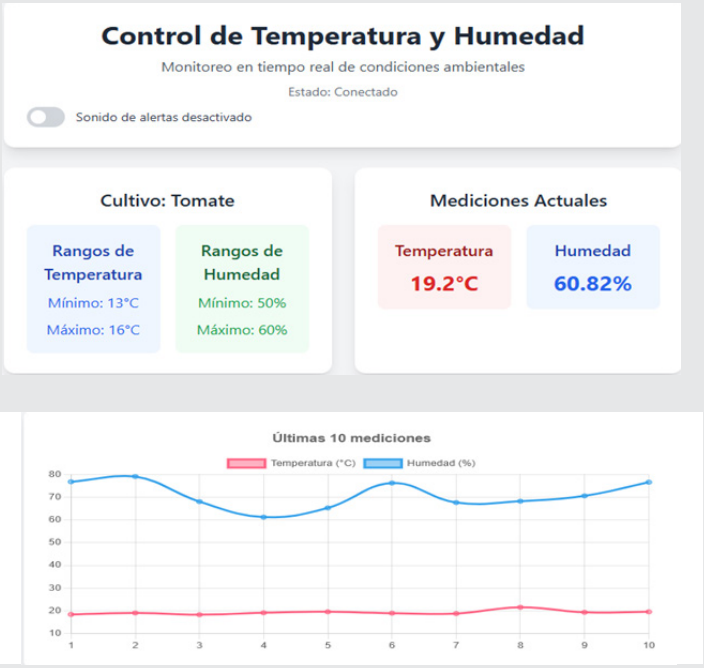


Figura 8: Interfaz del dashboard en móvil y escritorio que muestran gráficos y valores actuales.
Fuente: elaboración propia.

Sistema de alertas dinámicas

Cuando las mediciones de temperatura o humedad se salen de los rangos configurados para el cultivo, el sistema genera alertas visibles en el dashboard. Durante las pruebas se observó una actualización fluida de los datos en el dashboard, sin demoras perceptibles al usuario.

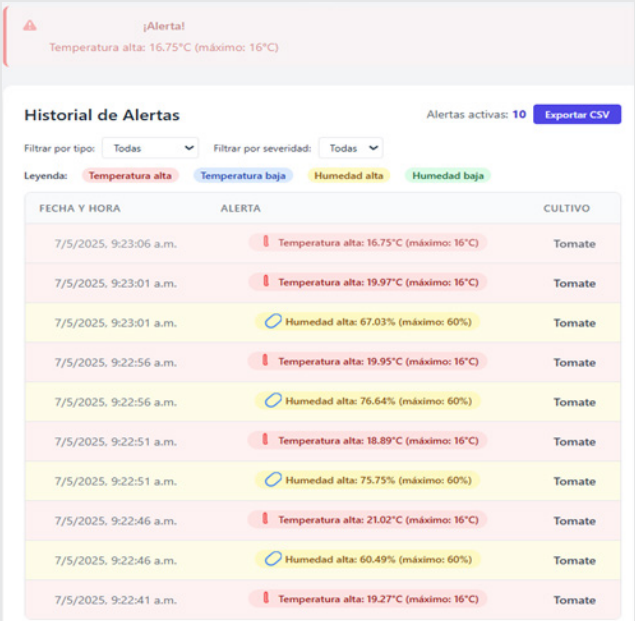


Figura 9: Ejemplo de alerta activa en el dashboard.
Fuente: elaboración propia.

Historial de mediciones con filtros

El usuario puede acceder al historial completo de mediciones, visualizando las últimas 10 alertas con fecha, hora y tipo de desviación (temperatura o humedad). Además, puede filtrar registros por rango de fechas y navegar entre páginas para análisis detallados.

Figura 10: Panel de historial con tabla de alertas y filtros por fecha. Fuente: elaboración propia.

Almacenamiento y asociación de datos

Cada medición recibida por WebSocket se almacena en SQLite con referencia al cultivo configurado para el usuario. Durante las pruebas funcionales en laboratorio, se registraron más de 1,000 mediciones sin pérdidas, garantizando integridad y trazabilidad de los datos recopilados a través de comunicación Wi-Fi en red local controlada.

Robustez y recuperación ante desconexiones

Se realizaron también pruebas de recuperación de conexiones para mantener el envío de datos confiables entre el componente sensor de datos y el componente de persistencia de datos (BD con SQLite). Para ello se realizaron simulaciones de desconexión de red durante las 72 horas de pruebas continuas, el ESP32 recuperó la conexión automáticamente y continuó enviando datos tras períodos de desactivación manual de Wi-Fi de 5, 15 y 30 minutos. La recuperación automática se logró en el 95% de los casos con un tiempo promedio de reconexión de 12 segundos. El servidor mantuvo la persistencia de datos y actualizó la interfaz tras restablecerse la conexión, asegurando continuidad en el monitoreo sin pérdida de las más de 1,000 mediciones registradas durante el período de evaluación.

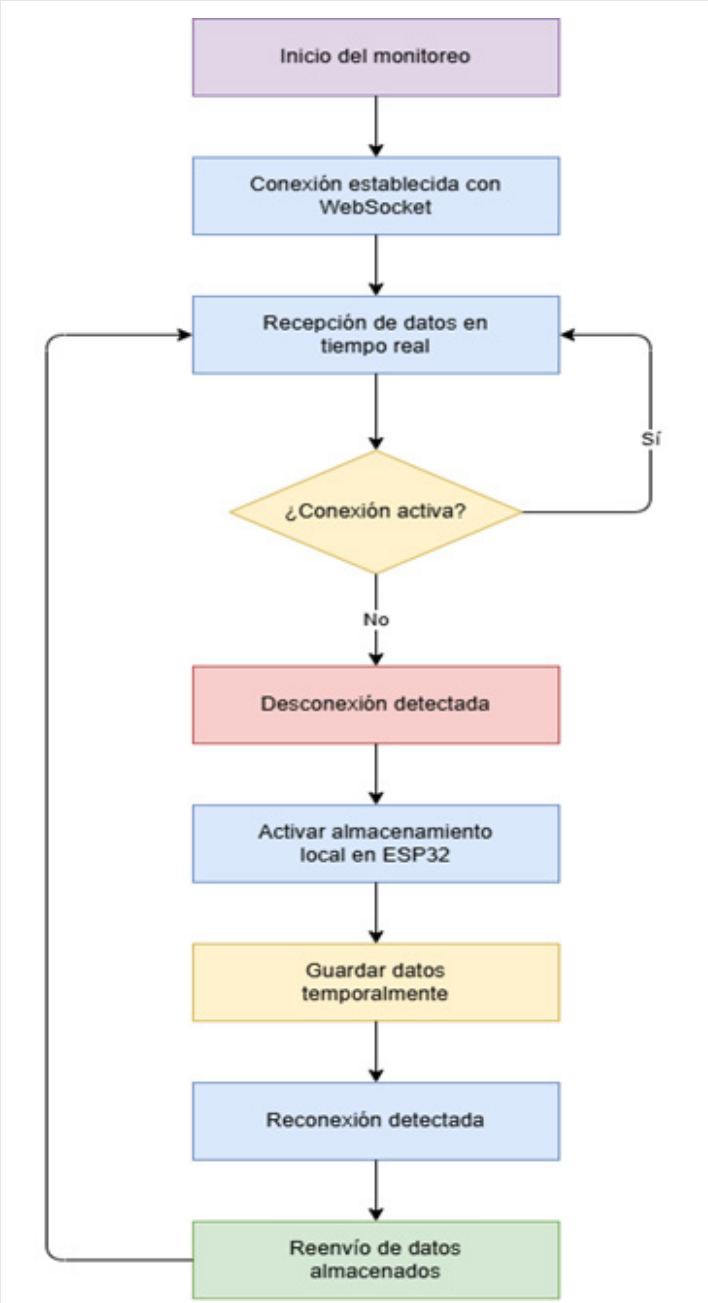


Figura 11: Algoritmo de continuidad de datos durante desconexiones y reconexiones.
Fuente: elaboración propia.

Viabilidad y facilidad de uso

Durante las pruebas en laboratorio, se evaluó la facilidad de instalación del sistema completo, incluyendo el montaje físico del sensor DHT22 al microcontrolador ESP32, la configuración del entorno de red local (Wi-Fi), la carga del firmware, la ejecución del servidor backend en Node.js, la conexión mediante WebSocket, y la visualización de datos en la interfaz web desarrollada en React.js. Todo el proceso fue llevado a cabo por un usuario con conocimientos técnicos básicos (estudiante de nivel universitario con experiencia general en desarrollo web y electrónica básica), sin necesidad de intervención especializada.

La instalación y configuración funcional del sistema se completó en un tiempo promedio de 87 minutos, medido desde el encendido inicial del microcontrolador hasta la visualización estable de los datos en el dashboard web, sin incluir la etapa de desarrollo ni depuración previa del código. Las condiciones del entorno incluyeron una red Wi-Fi estable, alimentación por puerto USB, y acceso a un equipo con Node.js previamente instalado.

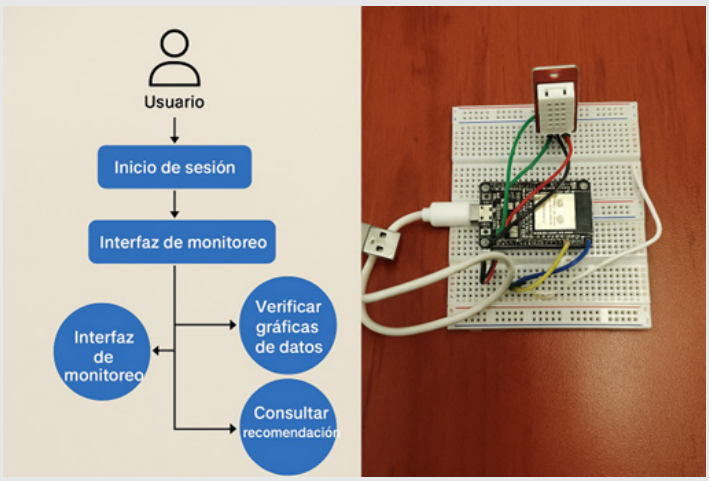


Figura 12: Esquema del flujo de trabajo para el usuario y fotografía del prototipo instalado.
Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

Discusión

Validación de la arquitectura y funcionalidades

El prototipo de sistema cumple con los objetivos de monitoreo en tiempo real y personalización, integrando hardware y software de forma eficiente. La comunicación WebSocket garantiza baja latencia y actualización inmediata, aspectos relevantes para aplicaciones de monitoreo agrícola. La baja latencia no es solo deseable sino esencial en agricultura de precisión, ya que los procesos biológicos de los cultivos ocurren en escalas de tiempo que requieren intervenciones rápidas y precisas para optimizar la producción y prevenir pérdidas.

Comparativa contra soluciones existentes

La solución propuesta presenta ventajas considerables frente a los sistemas documentados en la literatura previa, destacando principalmente el uso de WebSockets como tecnología de comunicación bidireccional y persistente entre cliente y servidor. A diferencia de los enfoques tradicionales basados en HTTP que requieren múltiples peticiones para actualizar datos, WebSocket permite transmisión en tiempo real con latencia inferior a 2 segundos, reduciendo el tráfico de red y mejorando la experiencia del usuario, mientras que trabajos como [10] no especifican este parámetro o reportan valores mayores.

La interfaz responsiva desarrollada con React.js y Tailwind CSS proporciona visualización dinámica que reacciona inmediatamente a cambios en condiciones ambientales, contrastando con interfaces limitadas reportadas por Ikram et al. [9]. La implementación se completa en menos de 90 minutos incluyendo montaje físico y configuración y permite configuración personalizada por cultivo con alertas dinámicas específicas, capacidad generalmente ausente en sistemas previos.

Los mecanismos de reconexión automática ante desconexiones simuladas fortalecen la robustez del sistema en contextos rurales con conectividad inestable, mientras que [11] reconocen el problema sin presentar pruebas automatizadas. El escenario de pruebas incluye simulación automatizada con Node.js generando datos normales y anómalos con monitoreo de latencia, contrastando con estudios como [8] que limitaron pruebas a invernaderos.

Estas capacidades hacen que el sistema sea más eficiente, fácil de implementar y mantener incluso por usuarios con conocimientos técnicos básicos, representando una ventaja considerable frente a soluciones previas más complejas y menos interactivas.

Importancia de la configuración personalizada

Permitir que el usuario seleccione o agregue cultivos con rangos óptimos específicos mejora la relevancia de las alertas y la utilidad del sistema, alineándose con recomendaciones para agricultura inteligente que enfatizan la adaptación a cultivos particulares. La implementación con React.js y Tailwind CSS asegura accesibilidad desde múltiples dispositivos, facilitando la adopción por agricultores con distintos niveles tecnológicos, en concordancia con estudios que resaltan la usabilidad como factor crítico en IoT agrícola.

Eficacia del sistema de alertas y gestión de datos

Las alertas en tiempo real permiten una rápida identificación de condiciones ambientales fuera de rango, apoyando la toma de decisiones para prevenir daños en cultivos. Este enfoque es fundamental para el monitoreo preventivo en agricultura. La capacidad del sistema para recuperar la conexión y continuar la transmisión de datos sin pérdida considerable representa una ventaja importante para entornos con conectividad variable, aunque las pruebas se realizaron en ambiente controlado de laboratorio. El uso de SQLite para almacenar datos con referencias a cultivos y usuarios facilita la trazabilidad y análisis histórico, aspectos esenciales para evaluar tendencias y planificar intervenciones agrícolas.

Limitaciones del estudio

Es importante señalar que el sistema fue validado únicamente en ambiente de laboratorio con un solo dispositivo IoT y usuario. Las pruebas no se realizaron en condiciones agrícolas reales con factores como interferencias electromagnéticas, condiciones climáticas extremas o múltiples dispositivos simultáneos. Para

considerar el sistema completamente validado para uso agrícola, se requieren pruebas de campo en condiciones reales durante períodos prolongados.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran que el prototipo de sistema web responsivo desarrollado constituye un fundamento tecnológico para la monitorización en tiempo real de temperatura y humedad en entornos agrícolas. La integración de sensores DHT22, microcontroladores ESP32 y tecnologías web como React.js y WebSocket permitió crear una solución funcional que facilita la recopilación, visualización y almacenamiento de datos ambientales con baja latencia y alta fiabilidad, según las pruebas realizadas en un entorno de laboratorio controlado.

Durante estas pruebas de 72 horas continuas, se simularon escenarios de desconexión y reconexión de red, logrando una recuperación automática del sistema sin pérdida de datos con una tasa de éxito del 95% y tiempo promedio de reconexión de 12 segundos, lo cual sugiere su potencial viabilidad para zonas rurales con conectividad limitada. Sin embargo, cabe aclarar que el sistema aún no ha sido validado en un entorno rural real ni bajo condiciones prolongadas (días, semanas o meses), por lo que su desempeño en situaciones reales podría presentar nuevos retos técnicos. El prototipo también se adapta fácilmente a distintos tipos de cultivo mediante configuraciones personalizadas, aumentando su aplicabilidad práctica. Su interfaz responsiva garantiza la accesibilidad desde múltiples dispositivos, facilitando su adopción por usuarios con diferentes niveles de experiencia tecnológica.

Este proyecto representa una contribución al desarrollo de herramientas tecnológicas accesibles para el monitoreo agrícola, proporcionando un fundamento que puede evolucionar hacia sistemas más complejos con capacidades predictivas y de automatización. Es fundamental reconocer que se trata de un prototipo funcional que requiere validación en condiciones agrícolas reales para confirmar su viabilidad práctica en el sector. Como líneas futuras de desarrollo, se plantea la implementación de pruebas de campo en entornos agrícolas reales durante períodos prolongados, la integración de múltiples sensores y dispositivos para escalabilidad, robustecimiento del transporte de datos con un esquema híbrido (MQTT + WebSockets) y la incorporación de técnicas de Machine Learning y analítica de datos que permitan anticipar condiciones adversas, fortaleciendo su utilidad como herramienta integral para la gestión agrícola basada en datos.

BIBLIOGRAFÍA

[1] A. Morchid, R. El Alami, A. A. Raezah, y Y. Sabbar, "Applications of internet of things (IoT) and sensors technology to increase food security and agricultural sustainability: Benefits and challenges," Ain Shams Engineering Journal, vol. 15, no. 3, p. 102509, 2024. https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102509.

[2] S. Mansoor, S. Iqbal, S. M. Popescu, S. L. Kim, Y. S. Chung, y J. H. Baek, "Integration of smart sensors and IOT in precision agriculture: trends, challenges and future prospectives," Frontiers in Plant Science, vol. 16, p. 1587869, 2025. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587869.

[3] Fosensor, "Temperature and humidity sensor in agriculture," Henan Fosen Electronics Technology Co., Ltd., ago. 23, 2023. https://www.hnfosensor.com/temperature-and-humidity-sensor-in-agriculture.html.

[4] Rika Sensor, "Exploring the benefits of using a temperature and humidity sensor in agriculture," Hunan Rika Electronic Tech Co., Ltd., oct. 16, 2024. https://www.rikasensor.com/exploring-the-benefits-of-using-a-temperature-and-humidity-sensor-in-agriculture.html.

[5] A. Soussi, E. Zero, R. Sacile, D. Trinchero, y M. Fossa, "Smart sensors and smart data for precision agriculture: A review," Sensors, vol. 24, no. 8, p. 2647, 2024. https://doi.org/10.3390/s24082647.

[6] Synox, "Temperature and humidity sensors for intelligent agriculture," jun. 14, 2023. https://www.synox.io/en/smart-agriculture/temperature-humidity-sensor-agriculture/.

[7] M. Dhanaraju, P. Chenniappan, K. Ramalingam, S. Pazhanivelan, y R. Kaliaperumal, "Smart farming: Internet of Things (IoT)-based sustainable agriculture," Agriculture, vol. 12, no. 10, p. 1745, 2022. https://doi.org/10.3390/agriculture12101745.

[8] M. Muthmainnah, M. F. Mulyadi, I. Tazi, A. Mulyono, F. S. Hananto, N. Chamidah, y K. Kusairi, "Development of an automated monitoring system for soil moisture and temperature in smart agriculture to enhance lettuce farming productivity based on IoT," Multidisciplinary Science Journal, vol. 6, no. 11, 2024. https://doi.org/10.31893/multiscience.2024233.

[9] M. Ikram, S. Ameer, F. Kulsoom, M. Sher, A. Ahmad, A. Zahid, y Y. Chang, "Flexible temperature and humidity sensors of plants for precision agriculture: Current challenges and future roadmap," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 226, p. 109449, 2024. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109449.

[10] P. Rajak, A. Ganguly, S. Adhikary, y S. Bhattacharya, "Internet of Things and smart sensors

in agriculture: Scopes and challenges," Journal of Agriculture and Food Research, vol. 14, p. 100776, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100776.

[11] M. A. Zamora-Izquierdo, J. Santa, J. A. Martínez, V. Martínez, y A. F. Skarmeta, "Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing," Biosystems Engineering, vol. 177, pp. 4-17, 2022. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.

[12] FAO, El cultivo de tomate con buenas prácticas agrícolas en la agricultura urbana y periurbana. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2013. https://www.fao.org/4/i3359s/i3359s.pdf.

[13] H. A. Ahmed, Y. X. Tong, y Q. C. Yang, "Optimal control of environmental conditions affecting lettuce plant growth in a controlled environment with artificial lighting: A review," South African Journal of Botany, vol. 130, pp. 75-89, 2020. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.12.018.

Ciencias de la Computación

Ingeniantes

Diseño y construcción de una mesa sísmica de dos grados de libertad

Colaboración
Diego Armando Ramírez Zúñiga; Antonio Concha Sánchez; Jaime Arroyo Ledesma, Universidad de Colima

Fecha de recepción: 18 de agosto de 2025
Fecha de aceptación: 10 de septiembre de 2025

RESUMEN: Este artículo presenta el diseño y la construcción de una mesa sísmica biaxial de bajo costo, desarrollada en el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de Colima. La mesa está conformada por una estructura base metálica, módulos lineales con motores BLDC tipo NEMA 23 y sensores, entre ellos encoders, acelerómetros y finales de carrera, cuyas señales son adquiridas mediante una tarjeta de adquisición de datos PCIe-6321. A diferencia de los modelos industriales de alto costo, esta propuesta utiliza materiales accesibles como acero estructural y aluminio, así como motores, drivers y sensores disponibles en plataformas de comercio electrónico. Esta selección, basada en criterios de bajo costo, fácil reposición y compatibilidad con el diseño mecatrónico, facilita en gran medida su réplica con fines académicos y experimentales. El sistema permite simular movimientos sísmicos en dos ejes con buena precisión, integrando medidas de seguridad y una arquitectura flexible que admite futuras mejoras.

PALABRAS CLAVE: Mesa sísmica biaxial, diseño y construcción, bajo costo, modelo CAD, instrumentación.

ABSTRACT: This article presents the design and construction of a low-cost biaxial shaking table, developed at the Mechatronics Laboratory of the University of Colima. The table consists of a metallic base structure, linear modules with NEMA 23 BLDC motors, and sensors, including encoders, accelerometers and limit switches, whose signals are acquired through a PCIe-6321 data acquisition card. Unlike high-cost industrial models, this proposal employs readily available materials such as structural steel and aluminum, as well as motors, drivers, and sensors commonly found on e-commerce platforms. This selection, based on criteria of low cost, ease of replacement, and compatibility with the mechatronic design, greatly facilitates its replication for academic and experimental purposes. The system enables the simulation of seismic motions along two axes with good accuracy, incorporating safety measures and a flexible architecture that allows for future upgrades.

KEYWORDS: Biaxial Seismic table, design and construction, low cost, CAD design, instrumentation.

INTRODUCCIÓN

México es un país altamente expuesto a la actividad sísmica debido a su ubicación geográfica sobre cinco placas tectóni-

cas principales: Pacífico, Norteamérica, Caribe, Rivera y Cocos [1]. Esta interacción tectónica ha generado a lo largo de la historia diversos eventos sísmicos que han ocasionado considerables pérdidas humanas, económicas y daños a la infraestructura nacional [2]. En particular, el estado de Colima representa una de las regiones de mayor riesgo sísmico en el país, al combinar suelos aluviales con elevadas aceleraciones del terreno, lo que incrementa su vulnerabilidad estructural [3]. Bajo este escenario, resulta necesario el desarrollo de herramientas experimentales que permitan evaluar el comportamiento estructural ante sismos, con el propósito de mejorar la capacidad de respuesta de las edificaciones y mitigar sus consecuencias.

En respuesta a esta limitación, se ha impulsado el desarrollo de mesas sísmicas de bajo costo, pero con capacidades suficientes para la validación experimental de modelos estructurales y el análisis de estrategias de control estructural. Las simulaciones computacionales han permitido modelar de manera virtual el comportamiento sísmico de edificaciones; sin embargo, estos modelos requieren validación experimental para garantizar su precisión. Las mesas sísmicas ofrecen la posibilidad de validar físicamente estos modelos mediante el ensayo de componentes o subestructuras físicas complementadas con simulaciones numéricas [4]. Esta metodología permite realizar pruebas representativas sin la necesidad de recurrir a prototipos a escala real, reduciendo considerablemente los costos y manteniendo validez experimental, siempre bajo el cumplimiento de las leyes de escalado estructural.

En este contexto, el propósito de esta investigación es establecer una plataforma experimental que contemple, en una primera etapa, el diseño y construcción de una mesa sísmica de dos grados de libertad. Asimismo, se busca proporcionar una herramienta académica que permita validar esquemas de control estructural aplicables en edificaciones futuras, contribuyendo así a mejorar la seguridad de las construcciones del estado de Colima.

El problema de investigación radica en la limitada disponibilidad de plataformas experimentales accesibles para reproducir excitaciones sísmicas de manera controlada. Ante esta situación, la principal contribución de este trabajo consiste en el desarrollo de un prototipo biaxial de bajo costo y fácil replicación, diseñado específicamente para ampliar las posibilidades de experimentación académica y de investigación en el campo de la ingeniería sísmica.

Revisión de literatura

El estudio de los efectos sísmicos en estructuras ha motivado el desarrollo de herramientas experimentales que permiten replicar dichos fenómenos en entornos controlados. Una de las más representativas es la mesa sísmica, cuyo uso se ha extendido desde finales del siglo XIX hasta la actualidad, permitiendo simular movimientos del suelo y observar el comportamiento dinámico de estructuras [5].

Las primeras mesas sísmicas fueron dispositivos mecánicos manuales, como la desarrollada en Japón por Fusakichi Omori y John Milne, descrita como un hito en la instrumentación sísmica temprana [6]. Posteriormente, estas fueron impulsadas por motores eléctricos, como la creada en la Universidad de Stanford en 1906 [7]. Más adelante, Ruge presentó una mesa con sistema hidráulico y válvula controlada por señal de error, lo que marcó un primer avance hacia el control automatizado [8].

A partir de los años 70, las mesas sísmicas comenzaron a incorporar sistemas de control más sofisticados, como en el caso de la mesa de la Universidad de California en Berkeley instalada por MTS System Corporation [9]. Esta generación de mesas permitió simular con mayor precisión distintos tipos de movimientos y aumentó significativamente las capacidades de carga y aceleración. Actualmente, existen mesas con hasta seis grados de libertad, como las de E-Defense en Japón o la Universidad de San Diego, capaces de realizar ensayos a escala real [10].

Dado el elevado costo de estas infraestructuras, se ha buscado desarrollar soluciones más accesibles para entornos académicos. En este contexto, mesas sísmicas uniaxiales y biaxiales de bajo costo han sido propuestas para fines educativos y de investigación, permitiendo analizar estructuras a escala sin comprometer la seguridad ni la precisión [11].

Diversos trabajos en México han contribuido a este objetivo. Instituciones como la UNAM, el IPN, la UANL, entre otras, han desarrollado mesas vibratorias con fines didácticos y de investigación. Casadiegos destaca que estas han sido clave para el análisis estructural típico del país, como viviendas de mampostería confinada o adobe [12]. Estas investigaciones han sido fundamentales para validar modelos numéricos y mejorar los criterios de diseño estructural.

Un área clave en la evolución de estas plataformas es el sistema de control. Los algoritmos más utilizados van desde el control clásico PID [13], hasta propuestas más modernas como el control por espacio de estados [14], o el control anticipativo tipo PIDF [15]. También se han explorado metodologías como el control adaptativo, que ha demostrado su eficacia [16], y los esquemas de control inteligente, que integran técnicas de redes neuronales y algoritmos genéticos [17]. Estas metodologías buscan mejorar la precisión con la que la mesa puede seguir señales de referencia sísmicas.

Otra tendencia relevante es el enfoque de subestructuración híbrida, que permite dividir una estructura en dos partes: una física y otra simulada computacionalmente. Así, solo una sección se prueba en la mesa sísmica mientras la otra se analiza mediante modelos numéricos, lo cual reduce significativamente los costos sin sacrificar fidelidad experimental [18].

MATERIAL Y MÉTODOS

En las etapas iniciales de consideraciones iniciales de diseño de la mesa sísmica, se definieron los criterios mecánicos y electrónicos necesarios para alcanzar un movimiento controlado en dos ejes perpendiculares. Con este fin, se optó por el uso de rodamientos lineales sobre rieles de aluminio de alta rigidez, ya que estos permiten un desplazamiento suave y rápido de la plataforma móvil. Esta plataforma se conecta directamente a un motor de corriente continua sin escobillas (BLDC), seleccionado por su elevada eficiencia, bajo mantenimiento y capacidad de proporcionar una respuesta dinámica rápida.

Para lograr el movimiento en dos grados de libertad, se dispuso un conjunto similar de rodamientos y rieles perpendiculares al primero, acompañado de un segundo motor sin escobillas. De esta manera, la mesa puede desplazarse independientemente en dos direcciones ortogonales (por ejemplo, a lo largo de los ejes X e Y), cumpliendo así con el objetivo principal de reproducir patrones de movimiento sísmico bidireccional. Esta configuración no sólo garantiza la precisión en la trayectoria, sino que también facilita el control de las condiciones dinámicas requeridas para las pruebas experimentales.

Uno de los objetivos fundamentales del diseño de la mesa sísmica es la capacidad de reproducir señales sísmicas con rangos de frecuencia y periodo relevantes para el estudio de la respuesta estructural. Con este fin, se estableció que las frecuencias de operación deben abarcar desde 0 hasta 10 Hz. Este rango de frecuencias implica la necesidad de replicar periodos hasta 0.1 s; garantizando así la reproducción fiel de fenómenos sísmicos característicos tanto de temblores de corta duración como de eventos con mayor periodo.

La amplitud del movimiento que puede generar la mesa sísmica depende de la capacidad del actuador principal y de la velocidad máxima alcanzable, la cual se ha estimado inicialmente en 50 cm/s. Esta velocidad repercute en la amplitud y frecuencia del movimiento posible, determinando así la aceleración máxima que puede ser transferida a la estructura en ensayo.

Las especificaciones de la mesa vibradora se muestran en la Tabla 1. Los valores presentados en esta Tabla se obtuvieron experimentalmente sometiendo la mesa vibradora a señales escalón para determinar su velocidad y aceleración máximas. También se aplicó una entrada chirp para caracterizar el comportamiento frecuencial de la mesa vibradora. Se utilizó un esquema de control PD en lazo cerrado para cada eje. Estos ensayos fueron esenciales para verificar el cumplimiento de las especificaciones de diseño dinámico.

Tabla 1. Especificaciones de la mesa (con clasificación E/P).

Descripción	Valor y unidad
Área de carga	74 x 74 cm
Aceleración máxima	3 g
Desplazamiento máximo	$\pm$ 20 cm
Velocidad máxima	50 cm/s
Capacidad de carga máxima	119.8 kg
Frecuencia máxima	10 Hz

Fuente: Elaboración propia.

Este conjunto de características permite realizar ensayos dinámicos sobre especímenes estructurales que se ajusten tanto a la capacidad máxima de carga de la plataforma como a su área de trabajo disponible. La altura de los modelos de prueba dependerá directamente de las dimensiones y pesos admitidos por el sistema, considerando además las restricciones propias de la frecuencia natural de las estructuras a escala, las cuales deben mantenerse dentro del rango operativo de la mesa para garantizar la validez experimental.

Con estos planteamientos se diseñó y construyó un simulador sísmico de dos grados de libertad que permite generar movimientos en ambas direcciones horizontales del plano longitudinal y transversal. Esto hace posible la simulación de ondas Love, caracterizadas por movimientos horizontales puros, y ondas Rayleigh, que combinan desplazamientos horizontales y verticales en un patrón elíptico [19].

El diseño de la mesa sísmica se desarrolló tomando como base las dimensiones y características mecánicas de las guías lineales seleccionadas. El módulo lineal consta de dos rieles paralelos equipados con un tornillo de bolas SFU1610, acoplados a deslizadores lineales que garantizan un movimiento preciso y eficiente. Estos deslizadores están conectados a una placa de aluminio que funge como soporte estructural para los componentes principales y transmite el movimiento generado por el motor acoplado al tornillo. La elección del aluminio para las partes móviles se fundamentó en su baja densidad y adecuada rigidez, propiedades que reducen la inercia generada durante los desplazamientos y mejoran la eficiencia dinámica del prototipo. Adicionalmente, la selección de un tornillo de bolas como sistema de transmisión ofrece una mayor eficiencia mecánica en comparación con otros mecanismos, gracias a su bajo coeficiente de fricción y alta precisión de posicionamiento, aspectos que contribuyen significativamente al desempeño global de la mesa sísmica.

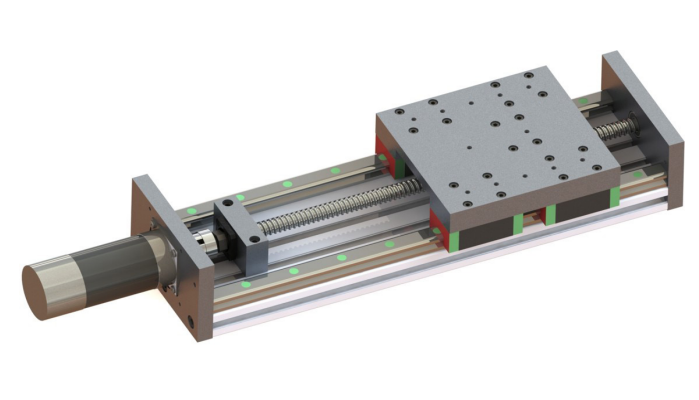


Figura 1: Modulo Lineal HLCNC.
Fuente: Modelado CAD de eje lineal con motor BLM57180 tipo NEMA 23.

Los componentes seleccionados para la construcción de la mesa sísmica fueron inicialmente diseñados para otras aplicaciones comerciales, como sistemas CNC, etc. Sin embargo, se adquirieron y se adaptaron para el ejercicio de simulación de movimientos sísmicos. Todos los componentes utilizados son de tipo comercial y pueden ser adquiridos a través de tiendas virtuales, lo que facilita su acceso y reposición en caso de ser necesario.

En la primera parte del diseño se utilizó material disponible en el laboratorio de Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad de Colima, tal como una placa metálica de dimensiones 84 x 84 cm, con un espesor de 11 mm y un peso aproximado de 75 kg, junto con una estructura metálica de perfil pesado, que se observa en la Figura 2.

Esta estructura metálica se reforzó y se unió mediante soldadura para garantizar alta rigidez y evitar movimientos no deseados ante la aplicación de cargas dinámicas. Además, esta base rígida sirvió como soporte para la instalación de los módulos lineales, proporcionando una plataforma estable para el resto del sistema. Cabe decir, que este punto es llamado como estructura base.

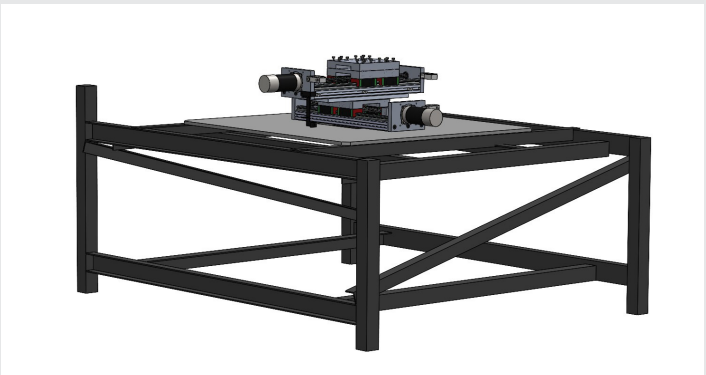


Figura 2: Estructura base y módulos lineales.
Fuente: Elaboración propia.

La segunda parte del diseño se enfocó en las partes móviles de la mesa sísmica, llamadas módulos lineales. Se seleccionó el aluminio como material principal de estos ejes debido a su bajo peso y adecuada rigidez. Estas características resultaron ideales para las piezas en constante movimiento, permitiendo una mayor eficiencia en la dinámica del sistema y reduciendo las inercias generadas por los desplazamientos. Esta combinación de materiales (acero para la estructura base y aluminio para los elementos móviles) optimizó tanto la resistencia estructural como el desempeño dinámico del sistema.

Actuadores

Para el movimiento controlado en dos grados de libertad, se seleccionaron dos módulos lineales modelo HLTNC-kit, que se usan usualmente en sistemas CNC, routers o impresoras 3D. Estos módulos están diseñados con un sistema de tornillo sin fin y deslizadores de tipo HGR20 lineales que permiten un desplazamiento preciso y eficiente, ya que corren sobre las guías los deslizadores y estos están sujetos a una placa de aluminio que su a vez también tiene fijado el tornillo sin fin. Entonces, al mover el tornillo sin fin, el conjunto completo realiza un desplazamiento. En consecuencia, el desplazamiento está definido por el tornillo sin fin, cuyo modelo es el SFU1610, el cual proporciona un desplazamiento de 1 cm por una revolución del tornillo.

Se seleccionaron motores de corriente directa sin escobillas y con sensores Hall para producir el movimiento de la mesa vibradora. Los motores adquiridos tienen marco tipo NEMA 23, cuyo modelo es el BLM57180-1000. Este motor ofrece una alta eficiencia y un menor mantenimiento en comparación con motores de escobillas. En la siguiente Tabla 2 se muestran sus características.

Tabla 2. Características técnicas del motor BLM57180-1000.

Características	Valor
Voltaje nominal	36 Vcd
Velocidad máxima	3000 rpm
Potencia	180W
Torque nominal	0.57 Nm
Encoder resolución	1000 PPR

Fuente: Información extraída de la DataSheet del fabricante Leadshine [20].

El desarrollo de la mesa sísmica se realizó en el laboratorio de Mecatrónica por el espacio y talleres aledaños para facilitar la construcción, como por ejemplo el taller de máquinas herramientas y el laboratorio de microelectrónica. También, se aprovechó el equipamiento como materiales disponibles del propio laboratorio (perfiles metálicos, placas de acero, sensores, entre otros).

Para poder controlar la parte electrónica y reproducir sismos de referencias se emplea una tarjeta de adquisición de datos modelo PCIe-6321 de National Instruments, la cual utilizará el software de Simulink de Matlab para el control de los actuadores y el monitoreo de los sensores del sistema a través de esta misma.

Sensores

En sistemas mecatrónicos, el uso de sensores es fundamental, ya que permiten obtener información precisa del entorno o del propio sistema para su monitoreo, control y operación segura. Los sensores actúan como los sentidos del sistema, traduciendo magnitudes físicas como aceleración, posición o velocidad en señales eléctricas que pueden ser procesadas por un controlador.

Acelerómetro

El primer sensor implementado en la mesa sísmica es un acelerómetro analógico de tres ejes (X, Y, Z) ADXL335, el cual detecta aceleraciones en un rango de ±3g, tiene bajo consumo de energía, tamaño compacto y respuesta lineal. La elección de un sensor analógico, en lugar de uno digital, obedece principalmente a la compatibilidad con la tarjeta de adquisición de datos PCIe-6321 de National Instruments, la cual no admite protocolos de comunicación serial como I2C o SPI, comúnmente utilizados por sensores digitales como el MPU6050. Al emplear un acelerómetro analógico, las señales de salida de cada eje pueden ser adquiridas directamente como entradas analógicas de voltaje diferencial por la tarjeta, simplificando así el proceso de adquisición y evitando la necesidad de conversores adicionales o interfaces de comunicación específicas. Por último, en la Figura 3 se aprecia la conexión pertinente hacia la tarjeta.

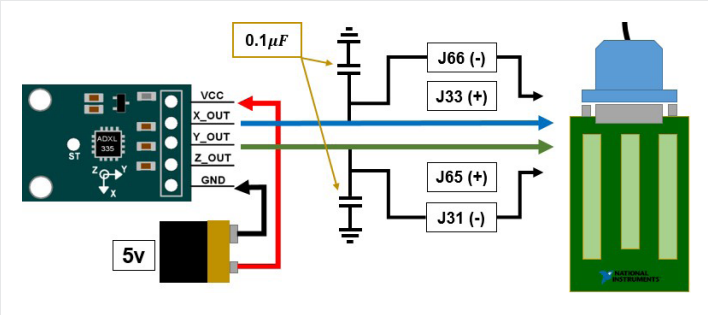


Figura 3: Acelerómetro ADXL335.
Fuente: Elaboración propia a partir de la Información extraída de la hoja de datos del fabricante del sensor [21].

La salida del sensor en cada eje X_{out} y Y_{out} está conectada de la forma diferencial a la tarjeta de adquisición de datos. Este tipo de conexión proporciona una mayor inmunidad al ruido electromagnético del entorno, ya que utiliza pares de señales (+ positivo y negativo-), transmitiendo la señal como la diferencia de voltaje entre ambos cables, en lugar de usar una referencia a tierra común (como en las señales single-ended).

Además, en cada salida de cada eje del acelerómetro se implementó un filtro pasa bajas mediante el uso de un capacitor de 0.1 µF, con el objetivo de limitar el ancho de banda de la señal de salida y así atenuar frecuencias no deseadas, como el ruido o interferencias. Con esta configuración, se obtiene un ancho de banda máximo aproximado de 50 Hz. Esta información fue extraída del datasheet del sensor.

Finales de carrera

Otro de los sensores implementados son los finales de carrera, los cuales cumplen dos propósitos. El primero consiste en actuar como un protocolo de seguridad, detectando cuando un eje ha alcanzado su límite físico, interrumpiendo el movimiento y evitando colisiones, sobrecargas o daños en la estructura. En este caso, el sensor envía un pulso de 5 V a la tarjeta de adquisición de datos. Esta señal está conectada a una compuerta lógica tipo OR, a la cual también se encuentra vinculado un paro de emergencia. De esta manera, cuando se activa cualquiera de estas condiciones, la ejecución del ensayo se interrumpe de forma inmediata, protegiendo al sistema frente a cualquier situación de riesgo.

El segundo propósito que se le da a los finales de carrera es una función adicional dentro del sistema para implementar una rutina de inicialización o "HOME", la cual permite centrar ambos ejes sobre sus respectivos rieles. Esta rutina opera a muy baja velocidad para evitar impactos mecánicos durante el desplazamiento. En la Figura 4, se visualiza la disposición de estos finales carrera.

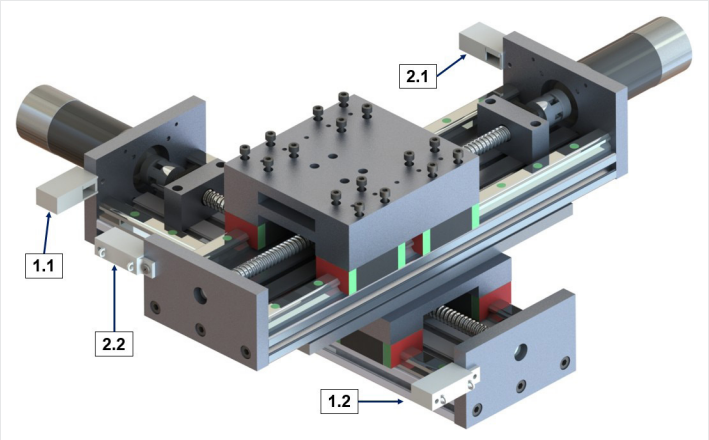


Figura 4: Ubicación de finales de carrera.
Fuente: Elaboración propia a partir de la Información extraída de la hoja de datos del fabricante [25].

La Figura 5 presenta la conexión de los interruptores de final de carrera. A través de la nomenclatura utilizada, el sensor etiquetado como "1.1" puede analizarse de la siguiente manera: el primer dígito (de izquierda a derecha) hace referencia al nivel del piso, mientras que el segundo dígito (después del punto) indica la posición de fijación, donde ".1" corresponde al lado del motor y ".2" al lado opuesto.

El ruido electromagnético puede detectarse erróneamente como una señal digital que indica que el interruptor está presionado, aunque no lo esté. Para evitar falsas detecciones causadas por ruido electromagnético se implementa un filtro pasa bajas, con las siguientes características:

Resistencias:
R_1,R_4.,R_7 y R_{10}=470 Ω,
R_2,R_5.,R_8 y R_{11}=1 kΩ,
R_3,R_6,R_9 y R_{12}=10 kΩ.
Capacitores:
C_1,C_2.,C_3 y C_4=0.1 µF

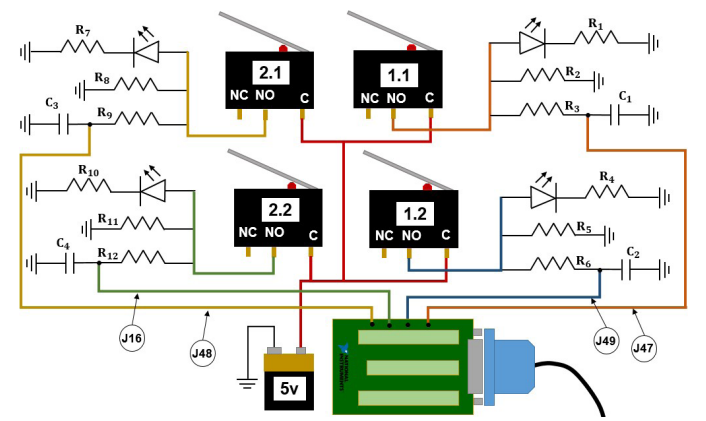


Figura 5: Conexiones para finales de carrera.
Fuente: Elaboración propia.

Interfaz de los actuadores

Para realizar el control de los motores de CD, se requiere una parte de procesamiento de señal, así como de potencia. El sistema utiliza una interfaz D2C-2CH para convertir la señal diferencial de salida del encoder del motor en una señal compatible con la tarjeta de adquisición de datos. El encoder genera señales diferenciales de tipo ABZ, adecuadas para registrar la posición y la velocidad del motor. Las señales diferenciales (A+, A-, B+, B-) son conectadas directamente a las entradas correspondientes de la interfaz D2C-2CH.

La interfaz D2C-2CH convierte las señales diferenciales (Push-Pull) a señales TTL (Transistor-Transistor Logic), compatibles con la tarjeta de adquisición de datos. Esta conversión es necesaria para que la tarjeta pueda leer y procesar las señales del encoder. La Figura 6 ilustra las conexiones pertinentes para su funcionamiento.

.

El sistema de control de los motores utiliza la placa ZS-X11H U1, diseñada para motores de CD sin escobillas de hasta 450W. Esta placa permite regular el voltaje, el sentido de giro, y frenado de los motores. La Figura 7 muestra el esquema de conexión de esta placa con la tarjeta de adquisición de datos.

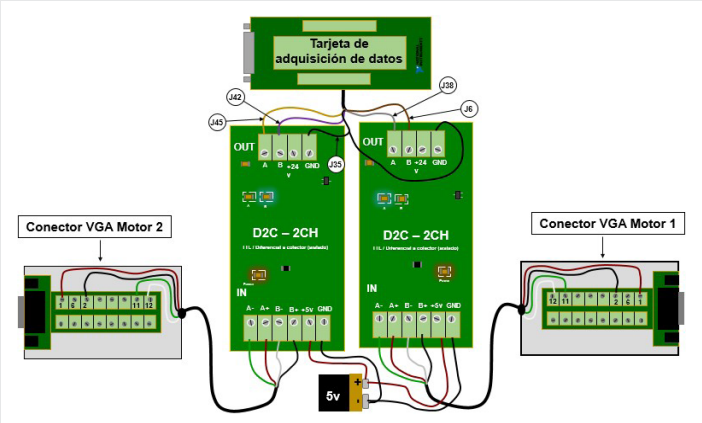


Figura 6: Interfaz D2C-2CH para leer los encoders
Fuente: Elaboración propia a partir de la Información extraída de la hoja de datos del fabricante [23].

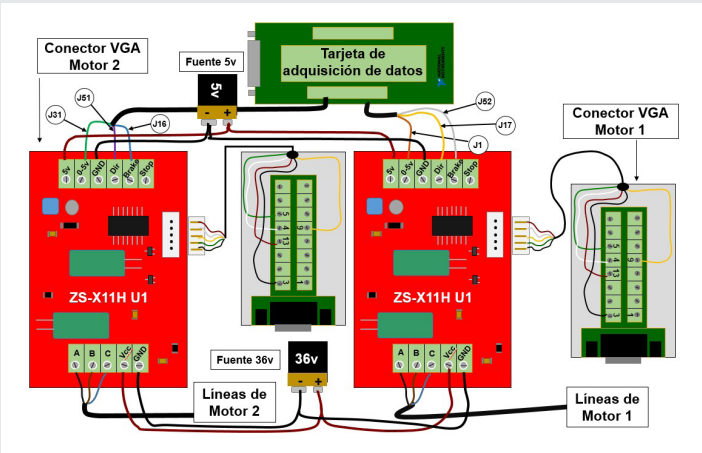


Figura 7: Controlador ZS-X11H U1 de los motores.
Fuente: Elaboración propia a partir de la Información extraída de la hoja de datos del fabricante [24].

En la Figura 8 se puede apreciar la integración de las partes mencionadas en esta sección para el control de la mesa sísmica usando la Tarjeta NI y una computadora personal.

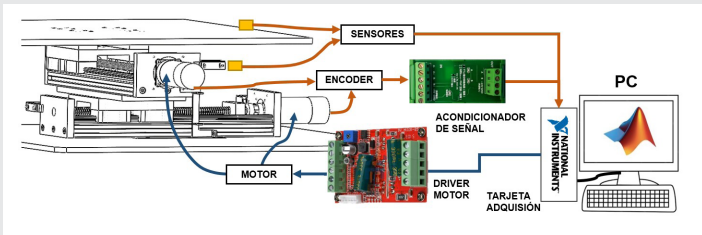


Figura 8: Diagrama esquemático de funcionamiento de la mesa.
Fuente: Elaboración propia.

El principio de funcionamiento del prototipo se basa en el movimiento en dos grados de libertad de la mesa vibradora. El movimiento se genera mediante módulos lineales ortogonales con tornillo de bolas SFU1610 y motores BLDC BLM57180-1000, controlados por drivers ZS-X11H U1. Los sensores (encoders, acelerómetro ADXL335 y finales de carrera) proveen retroalimentación, mientras que la tarjeta NI PCIe-6321 adquiere

señales y envía referencias desde Matlab/Simulink. De esta manera, la plataforma reproduce trayectorias sísmicas.

RESULTADOS

En la plataforma construida también se integraron componentes auxiliares cuya función es facilitar el montaje, proteger los elementos electrónicos y asegurar el orden y la seguridad del sistema. La Figura 9 ilustra el sistema completo ensamblado, donde se pueden identificar claramente los distintos subsistemas que lo componen.

Estos elementos auxiliares comprenden la base de la fuente CD (3), la caja de control (12), la base para conexiones eléctricas (9), paro de emergencia para detener el experimento (14) y los soportes de cableado (13).

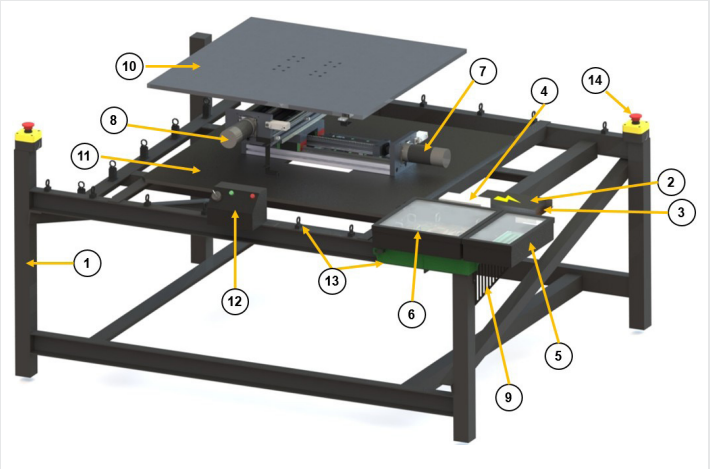


Figura 9: Vista general del modelo CAD del prototipo.
Fuente: Elaboración propia

Todos ellos cumplen un rol complementario pero indispensable para garantizar la estabilidad del sistema, la protección del usuario y la correcta gestión de la señal y la energía del sistema. Además, es conveniente mencionar el resto de las partes: Estructura base (1), Fuente CD (2), Caja de conexiones eléctricas (4), Caja de tarjeta de adquisición de datos (5), Caja de conexiones eléctricas (6), Eje lineal "2" (7), Eje lineal "1" (8), Placa de aluminio (área de ensayo) (10), Placa de metal (estructura base) (11) y Paros de emergencia (14).

De este modo, se obtiene un prototipo completo y funcional para realizar pruebas biaxiales, útil como herramienta en aplicaciones estructurales y académicas. El diseño incorpora protocolos de seguridad que cumplen con las especificaciones establecidas: la estabilidad del sistema está garantizada por una base metálica rígida con uniones soldadas; la protección del usuario, mediante paradas de emergencia y cajas de resguardo; y la gestión de señales y energía, a través de filtrado y fuentes de alimentación independientes. La Tabla 3 detalla el listado de partes, componentes y el costo total asociado al desarrollo del proyecto.

Tabla 3. Listado de Piezas y Costos.

No. Pieza	Concepto	Monto
1	Fuente CD 36v 180w	$486.0
2	Eje lineal HLTNC	$12,000.0
2	Motor BLM57180	$4,600.0
1	Placa Aluminio 15x36 cm	$1,000.0
2	Driver ZS-X11 U1 460	$460.0
2	Codificador D2C – 2CH 894	$894.0
4	Final de carrera	$160.0
1	Acelerómetro	$200.0
1	Placa aluminio CNCGX150	$1,300.0
2	Carretes de filamento PLA	$585.72
1	Placa de aluminio 71x71 cm	$4,591.7
1	Tornillería, brocas y machuelos 662.58	$662.58
1	Ferretería (Cable, cinchos, terminales, sujetadores, pintura)	$1330.1
1	Electrónica (Paros de emergencia, selector, capacitores, protobaquelita, cable, termofil)	$837.0
1	Soldadura de relleno aluminio	$750.0
Total		$29,857.1

Fuente: Los montos incluyen envió y costo aduanal.

La Tabla 4 se presentan algunos modelos comerciales representativos, destacando una de sus características.

Tabla 4. Comparativa de mesas vibratorias comerciales.

Fabricante	Modelo	Peso Máx.	Precio Aprox. (USD)
Quanser	Shake Table II	5 Kg	$ 15,000 – $ 25,000
MTS Systems	244.xx Series	50 T	$ 200,000 – $ +1M
Servotest	Seismic Table	100 T	$ +500,000
DIDATEC	EDU-SHK	5 Kg	$ 3,000 – $ 8,000
Control Systems MX	CSM-Shake	20 Kg	$ 10,000 – $ 30,000
EnekoTech	ShakeTable Lite	3 Kg	$ 1,500 – $ 4,000
ANCO Engineers	R-201/R-202	80 – 160 Kg	$20,000 - $50,000

Fuente: Elaboración propia.

Los precios incluidos en esta tabla comparativa se basan en información pública y estimaciones de mercado, no constituyen cotizaciones oficiales ni actualizadas.

Además, no se consideran costos adicionales asociados al funcionamiento de las mesas, como el software de control, computadoras, ni posibles gastos de importación en caso de no contar con un distribuidor local. La información fue recopilada de los sitios webs oficiales de cada marca y, en cada caso, se presenta únicamente uno de los varios modelos disponibles por fabricante.

CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo se fundamentan en los datos obtenidos durante el proceso de diseño y construcción del prototipo de mesa sísmica. En primer lugar, se logró materializar un sistema biaxial capaz de reproducir movimientos en dos ejes horizontales con una frecuencia operativa de hasta 10 Hz, un desplazamiento máximo de ±20 cm, una velocidad aproximada de 0.5 m/s y una capacidad de carga de 119.8 kg. Estas características permiten la reproducción de fenómenos sísmicos relevantes en escalas reducidas.

En segundo lugar, el análisis comparativo de costos muestra que, con un presupuesto aproximado de $29,857.1 MXN, el prototipo representa una alternativa de bajo costo frente a mesas vibratorias comerciales cuyo valor puede superar los $15,000 USD en equipos de laboratorio o incluso alcanzar cifras cercanas al millón de dólares en instalaciones industriales.

En tercer lugar, el sistema garantiza estabilidad estructural mediante la base metálica rígida, protección del usuario con paros de emergencia y cajas de resguardo, y adecuada gestión de señales y energía mediante el filtrado y distribución independiente de las fuentes.

Finalmente, la importancia de este desarrollo radica en que se ha establecido una plataforma experimental replicable y accesible, que constituye una herramienta académica y de investigación para validar modelos estructurales y ensayar esquemas de control, fortaleciendo así la preparación frente a riesgos sísmicos en el ámbito local.

Trabajo a futuro

En una segunda de esta investigación, se contempla la implementación y evaluación de diferentes técnicas de control automático aplicadas a la mesa sísmica, fundamentadas en su modelo matemático e identificación paramétrica. El objetivo de esta fase será analizar el desempeño de diversos algoritmos de control en el seguimiento de señales de referencia sísmica, comparar los resultados obtenidos con estudios previos y validar la efectividad de cada estrategia de control y consolidar una plataforma experimental como una herramienta académica y de investigación para el análisis y validación de esquemas de control estructural para las edificaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen SECIHTI, PRODEP-SEP, y a la Universidad de Colima por el apoyo para la realización de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Castro V. H. E., y X. P. Campos (2018). ¿Qué son los SISMOS, dónde ocurren y cómo se miden? Revista Ciencia, 69(3), 8-15.

[2] Dávalos K. N. D. D. & J. M. R. Esteves (2021). El sismo del 21 de enero de 2003 en Colima: estudio de la percepción social para la gestión del riesgo de desastres. Sociedad y ambiente, 24, 1–26.

[3] Ayuntamiento de Colima (2012). Programa municipal de ordenamiento territorial de Colima. Obtenida de la página electrónica: http://ipco.gob.mx.

[4] Mendoza, P. C. (2018). Análisis de un modelo analítico para evaluar la interacción entre una mesa vibratoria y una estructura de ensayo durante ensayos de simulación sísmica Veritas et Scientia – UPT, 7(1), 836–847.

[5] Wood R. M. (1988). Robert Mallet and John Milne—earthquakes incorporated in Victorian Britain. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 17(1), 107–142.

[6] Bernal D. (2013). Automatización de mesas vibratorias y sistemas de control estructural. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

[7] Reitherman R. (2006). The effects of the 1906 earthquake in California on research and education. Earthquake Spectra, 22(2), 207–236.

[8] Ruge P. (1936). Machine for the Reproduction of Earthquake Displacement Records. Bulletin of the Seismological Society of America, 26(3), 193–213.

[9] Severn R. (2011). The development of shaking tables – A historical note. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 40, no. 2, pp. 195–213.

[10] Tagawa Y. & K. Kajiwara (2007). Controller Design for Large-Scale Shaking Tables. Japan: Japan Building Research Institute.

[11] Carrillo J. (2013). Evaluación del comportamiento dinámico de una mesa sísmica educativa. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.

[12] Casadiegos E. M. (2023). Modelamiento y análisis estructural para validación en mesas vibratorias. México: Universidad Autónoma de Guerrero.

[13] O'hagan, J., & Ma, Q. (2012). Experimental assessment of PID control for a uniaxial shake table. En 15th World Conference On Earthquake Engineering. Lisboa, Portugal.

[14] Ogata K. (2003). Ingeniería de control moderna. 4a ed. México: Prentice Hall.

[15] Zhong Q. C. (2012). Feedforward Control: Basics, Models and Applications. London: Springer.

[16] Ozcelik M. (2008). Experimental performance of adaptive control in shaking table. Journal of Earthquake Engineering, 12(4), 555–576.

[17] Zhang Y. (2023). Intelligent seismic control of high-rise buildings using LSTM and genetic algorithms. Structural Control and Health Monitoring, 30(2), 3180.

[18] Severn R. (2011). Substructuring Methods in Earthquake Simulation. Earthquake Spectra, 27(3), 575–593.

[19] Ruvalcaba J. A. F. (2020). Estudio de la dispersión de ondas superficiales a partir de ruido sísmico ambiental en el norte del Golfo de California. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

[20] Leadshine Technology Co. Ltd. (n.d.). BLM57180 Series Brushless DC Motor. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de https://www.leadshine.com/legacys/BLM57180.html.

[21] Analog Devices. (n.d.). ADXL335: Small, Low Power, 3-Axis ±3 g Accelerometer. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de https://www.analog.com/en/products/adxl335.html.

[22] National Instruments. (n.d.). NI PCIe-6321 Multifunction I/O Device Specifications. Austin, TX: National Instruments. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/pcie-6321-specs/page/specs.html?srsltid=AfmBOorX5oWG7jxosFmrzoiEtxJfWZoSIRQbftmshVhL4u2buSr6N5zJ.

[23] QTLuxury. (n.d.). D2C-2CH Differential to TTL Encoder Signal Converter Board. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de https://es.aliexpress.com/item/1005002086155437.html.

[24] ZS-X11H U1 Brushless DC Motor Controller (n.d.). Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de https://es.aliexpress.com/item/1005001738213078.html.

[25] HLTNC. (n.d.). Módulo lineal CNC con tornillo de bolas SFU1610 y guías HGR20. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de https://es.aliexpress.com/item/4001282255200.html.

Multidisciplinario
e
ingenierías
Ingeniantes

Propuesta conceptual de una arquitectura para un asistente de predicción de glucosa (GPA) basada en la revisión de la literatura

RESUMEN: El manejo efectivo de la diabetes requiere control glucémico preciso y acciones proactivas. Este trabajo aporta (i) una revisión crítica de las técnicas de predicción de glucosa sanguínea (BGL) –aprendizaje automático tradicional, modelos de aprendizaje profundo (LSTM, CNN, Transformers y enfoques híbridos) y el rol emergente de los Modelos de Lenguaje a Gran Escala (LLMs), considerando variables como carbohidratos e insulina–, y (ii) la propuesta arquitectónica GlucoPredict-Assist (GPA) para pronóstico personalizado de BGL y generación de sugerencias de dosis.

El desarrollo se estructura en tres pasos: primero, se analizan enfoques avanzados (descomposición de señales, personalización y uso de modelos preentrenados) y su impacto en eficiencia y precisión; segundo, se identifican brechas, en particular la integración de predicciones fiables con sugerencias de dosis seguras, así como limitaciones y riesgos actuales de los LLMs; tercero, se diseña GPA priorizando seguridad, interpretabilidad y adaptación individual.

Esta propuesta establece las bases para una herramienta que, al mitigar picos y favorecer decisiones informadas, podría mejorar de forma significativa el automanejo de la diabetes.

PALABRAS CLAVE: Aprendizaje Profundo, Arquitectura de Sistemas, Diabetes Mellitus, Dosificación de Insulina, Predicción de Glucosa, Modelos de Lenguaje Grandes.

Colaboración
Dante Heriberto González González; Pedro Antonio Ibarra Facio; Luis Eduardo Morán López; Walter Alexander Mata López, Universidad de Colima

Fecha de recepción: 25 de agosto de 2025
Fecha de aceptación: 11 de noviembre de 2025

ABSTRACT: Effective diabetes management requires accurate glycemic control and proactive actions. This paper provides (i) a critical review of blood glucose (BGL) prediction techniques–traditional machine learning, deep learning models (LSTM, CNN, Transformers, and hybrid approaches), and the emerging role of Large Language Models (LLMs), considering variables such as carbohydrates and insulin–and and (ii) the GlucoPredictAssist (GPA) architectural proposal for personalized BGL forecasting and dose suggestion generation.

The development is structured in three steps: first, advanced approaches (signal decomposition, personalization, and use of pre-trained models) and their impact on efficiency and accuracy are analyzed; second, gaps are identified, in particular the integration of reliable predictions with safe dose suggestions, as well as current limitations and risks of LLMs; third, GPA is designed prioritizing safety, interpretability, and individual adaptation.

This proposal lays the foundation for a tool that, by mitigating spikes and promoting informed decisions, could significantly improve diabetes self-management.

KEYWORDS: Deep Learning, System Architecture, Diabetes Mellitus, Insulin Dosing, Glucose Prediction, Large Language Models.

INTRODUCCIÓN

La diabetes mellitus representa una condición crónica generalizada globalmente, que exige un automanejo meticuloso para prevenir complicaciones severas. Un pilar fundamental es el control de los niveles de glucosa sanguínea (BGL, por sus siglas en inglés) el cual es una variable dinámica influenciada

por múltiples factores: la ingesta de carbohidratos, la medicación de insulina, la actividad física, el estrés y la variabilidad fisiológica individual. Esta complejidad se acentúa con nuevas opciones terapéuticas y riesgos metabólicos adicionales, presentando a menudo a los profesionales sanitarios múltiples opciones terapéuticas válidas según las guías, pero sin un consenso claro sobre el enfoque óptimo [1]. Aunque la tecnología de Monitoreo Continuo de Glucosa (CGM, por sus siglas en inglés) ofrece datos valiosos en tiempo real, su interpretación y la acción proactiva derivada continúan siendo un desafío, incluso con herramientas de análisis como el Perfil Ambulatorio de Glucosa (AGP, por sus siglas en inglés) [2].

Este trabajo responde a la necesidad, tanto personal como general, de disponer de herramientas más eficaces para anticipar las fluctuaciones futuras de BGL y, de forma crucial, para guiar la dosificación adecuada de medicamentos, permitiendo manejar proactivamente los picos de glucosa. El objetivo central es doble: primero, realizar una revisión exhaustiva de las técnicas actuales de inteligencia artificial para la predicción de BGL; segundo, proponer una arquitectura de sistema que integre predicción personalizada con sugerencias de dosis seguras y accionables, buscando así mejorar el control glucémico y la calidad de vida.

En este marco, la investigación se guía por una pregunta puntual: ¿cómo anticipar, con datos de CGM y variables clínicas (carbohidratos, insulina, actividad), las variaciones de BGL a corto plazo y convertir esas predicciones en sugerencias de dosificación seguras y accionables? Para darle desarrollo, se delimitó el alcance (predicción personalizada y apoyo a la dosificación), se definieron criterios y población de referencia, y se ejecutó una revisión de la literatura conforme al proceso general de la Figura 1 (objetivo y alcance → búsqueda y cribado → extracción y organización → síntesis temática y análisis crítico).

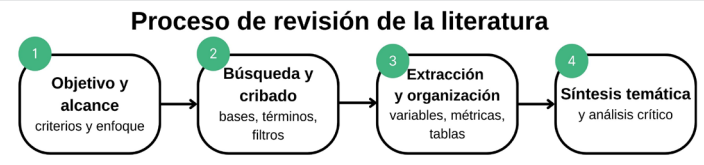


Figura 1. Proceso de revisión.
Fuente: Creación Propia.

Las principales aportaciones son: (i) Identificación de una necesidad crítica: ausencia de herramientas que integren predicción fiable de BGL con sugerencias de dosis seguras y personalizables; (ii) Revisión exhaustiva del estado del arte: análisis de métodos tradicionales y de aprendizaje profundo (LSTM, CNN, Transformers y enfoques híbridos), variables y métricas reportadas; (iii) Evaluación del papel de los LLMs en diabetes: potencial para sugerencias/explicaciones y límites y riesgos en seguridad clínica; y (iv) Propuesta de arquitectura: GlucoPredictAssist (GPA), orientada a seguridad, interpretabilidad y adaptación individual, que integra predicción y soporte a la dosificación.

Para cumplir con este doble objetivo, la revisión de la literatura se estructuró de manera crítica y progresiva. Se comenzó con el análisis de los métodos de predicción de BGL, desde el aprendizaje automático tradicional hasta las arquitecturas de aprendizaje profundo más avanzadas (LSTM, CNN, Transformers y enfoques híbridos), evaluando su precisión y eficiencia. Posteriormente, la revisión se focalizó en un desafío crítico: la integración de estas predicciones con sugerencias de dosificación seguras, examinando el rol emergente de los Modelos de Lenguaje a Gran Escala (LLMs) y sus inherentes riesgos de seguridad en el ámbito clínico.

La hipótesis fundamental sostiene que una combinación sinérgica de modelos de aprendizaje profundo (posiblemente incorporando descomposición de señales, mecanismos de atención y estrategias de personalización) junto con una arquitectura cuidadosamente diseñada que integre principios de seguridad y supervisión humana, puede superar las limitaciones actuales y mejorar significativamente el automanejo de la diabetes.

Revisión de la literatura

La predicción de los niveles de BGL es un campo de estudio extenso. Los enfoques iniciales comprenden modelos estadísticos y técnicas de aprendizaje automático tradicional, incluyendo Support Vector Regression (SVR), Random Forests, y árboles de decisión. Aunque son útiles, estos métodos a menudo tienen dificultades con su naturaleza no lineal, dinámica y multifactorial de la regulación de la glucosa.

El aprendizaje profundo demuestra un potencial considerablemente mayor en este dominio. Las Redes Neuronales Recurrentes (RNNs, por sus siglas en inglés), y en particular las Long Short-Term Memory (LSTMs), son inherentemente adecuadas para capturar las dependencias temporales,[3]. Por otro lado, las Redes Neuronales Convolucionales (CNNs, por sus siglas en inglés) se emplean para extraer patrones locales, frecuentemente integrados en arquitecturas híbridas CNN-LSTM [4]. Más recientemente, los modelos Transformer y los mecanismos de atención, como los implementados por Armandpour [5], muestran una notable capacidad para modelar dependencias a largo plazo e integrar fuentes de datos multimodales. Estrategias híbridas que combinan la descomposición de características, por ejemplo, mediante Variational Mode Decomposition (VMD) con LSTMs para capturar tendencias a largo plazo y Transformers para fluctuaciones a corto plazo, junto con técnicas de optimización como Knowledge Distillation para la compresión

de modelos, reportan mejoras significativas en precisión y eficiencia [6].

Un desafío persistente es la integración efectiva de datos multimodales CGM, carbohidratos, insulina, actividad física, estrés, etc. Que presentan diferentes características de muestreo y grados de dispersión. Para lo que se proponen soluciones como la transformación de eventos discretos en señales continuas (SSR, por sus siglas en inglés) [6] o el uso de capas de embedding aprendibles junto con modelos preentrenados como Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) para manejar datos estructurados de registros médicos longitudinales [7]. La personalización es un elemento vital; enfoques como el uso de embeddings específicos de usuario [5] o el ajuste fino (fine-tuning) de modelos pre-entrenados [7] permiten adaptar modelos generales a las particularidades fisiológicas y de comportamiento de cada individuo. La eficiencia computacional es otro factor crítico, especialmente para el despliegue en dispositivos móviles o de borde; técnicas como Knowledge Distillation [6] y la optimización de implementaciones son, por tanto, relevantes. La interpretabilidad de los modelos de aprendizaje profundo, aunque es compleja, es de gran importancia, y métodos como los gradientes integrados pueden ayudar a identificar los factores clínicos más influyentes [7].

En el panorama reciente, los LLMs como GPT-4 emergen con potencial en el ámbito de la salud. Pueden responder preguntas [8],[9], resumir información, analizar datos de CGM [2] e incluso asistir en la generación de planes de manejo o selección de medicación [1],[10]. No obstante, su aplicación directa para tareas numéricas precisas como la predicción de BGL o el cálculo de dosis de medicación conlleva comparativos indican que, si bien los LLMs pueden generar planes de tratamiento o seleccionar medicaciones alineadas con guías clínicas, a menudo adoptan un enfoque más cauteloso que los expertos humanos [1] o, preocupantemente, pueden cometer errores críticos de seguridad como omitir medicamentos necesarios, continuar terapias inadecuadas o sugerir dosis incorrectas en un porcentaje no despreciable de casos [10]. Además, pueden exhibir sesgos hacia tratamientos más nuevos o costosos [1] y su fiabilidad se ve comprometida por la posibilidad de generar información incorrecta o "alucinaciones" [8]. La confianza pública en estos sistemas, particularmente en situaciones agudas, es limitada, con una preferencia mayoritaria por la supervisión de profesionales sanitarios [8],[11]. Técnicas como la Generación Aumentada por Recuperación (RAG, por sus siglas en inglés) pueden mejorar la fiabilidad al anclar las respuestas en fuentes de conocimiento confiables [9]. Asimismo, los sistemas que incorporan Humano en el bucle (HITL, por sus siglas en inglés) se consideran esenciales para mitigar riesgos y asegurar una implementación segura y efectiva [1].

3. ARQUITECTURA PROPUESTA

Derivado de la revisión de literatura y con el fin de abordar las brechas identificadas, en especial la necesidad crítica de unificar predicciones precisas de BGL con sugerencias de dosificación que sean seguras, fiables y aplicables, se propone una arquitectura de sistema integrado, denominada provisionalmente GlucoPredictAssist (GPA). Este sistema se concibe para el pronóstico personalizado de BGL y la generación asistida de sugerencias de dosis de insulina, fundamentándose en los principios de seguridad, interpretabilidad y adaptación individual a través de un enfoque robusto de Interacción Humano-Computadora (HITL).

3.1 Metodología de Diseño de la Arquitectura

El diseño de la arquitectura GPA se fundamentó en un enfoque de Sistemas centrado en los requisitos, siguiendo un proceso de tres etapas clave impulsado por los hallazgos de la revisión de literatura. Este proceso metodológico buscó asegurar la robustez clínica y la seguridad del usuario desde la concepción:
Para facilitar la comprensión, la Figura 2 resume el proceso en tres tres macroetapas, compuestas por nueve subetapas: I) Datos y Modelado (1: adquisición de datos; 2: preprocesamiento; 3: modelado de BGL; 4: personalización); II) Sugerencia y Control (5: sugerencia de dosis; 6: módulo LLM; 7: seguridad y validación; 8: supervisión humana); y III) Monitoreo/MLOps (9: monitoreo y retroalimentación).

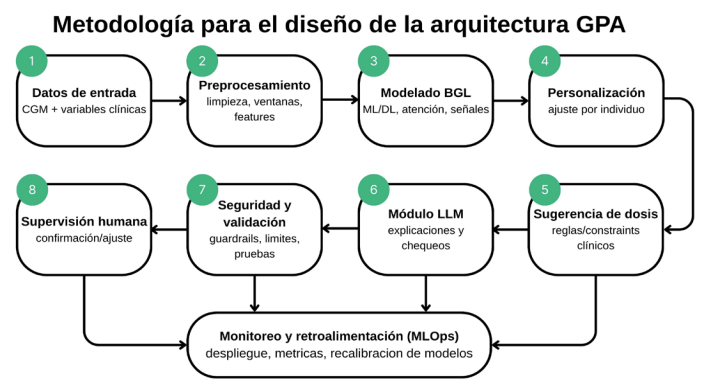


Figura 2. Metodología para la arquitectura GPA.
Fuente: Creación Propia.

Las subsecciones siguientes desarrollan estas tres macroetapas: (1) Identificación de brechas y requisitos, (2) Definición de principios rectores y (3) Conceptualización modular y flujo de datos.

Identificación de Brechas Críticas y Requisitos: Se definieron las necesidades funcionales (predicción personalizada, dosificación asistida) y, de forma primordial, los requisitos de seguridad (prevención de hipoglucemia severa) a partir de las limitaciones documentadas en modelos de Machine Learning y LLMs.
Definición de Principios Rectores: Se establecieron la

Seguridad, la Interpretabilidad y la Adaptación Individual (Personalización) como los pilares absolutos que deben guiar la funcionalidad de cada componente.

Conceptualización Modular y Flujo de Datos: Se tradujeron los requisitos y principios en una estructura de módulos funcionales interconectados (Módulos A a E), diseñados para asegurar la implementación del concepto Humano en el Bucle (HITL).

Estas tres macroetapas se desarrollan en las subsecciones siguientes; la Figura 2 muestra el desglose operativo en subetapas y la Figura 3 materializa su integración arquitectónica.

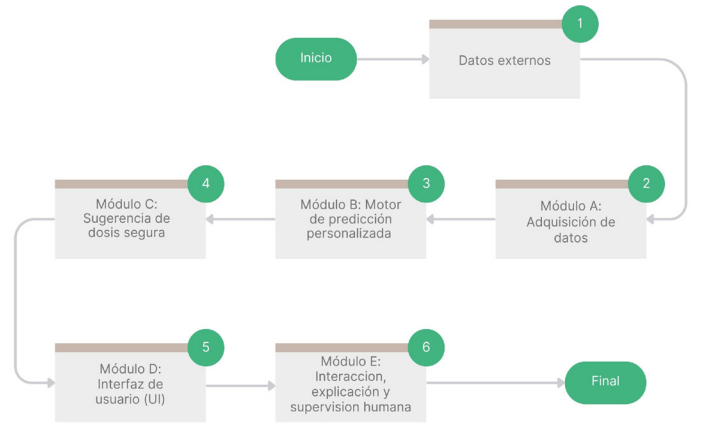


Figura 3. Diagrama general de la arquitectura GPA.
Fuente: Creación Propia.

Módulo A: Adquisición y Preprocesamiento de Datos

Este módulo actúa como el punto de entrada de información al sistema GPA, tal como se representa en la Figura 4. Es responsable de recolectar datos de diversas fuentes: mediciones del sensor de Monitoreo Continuo de Glucosa (CGM), datos de actividad física obtenidos de aplicaciones de salud móviles, estimaciones de ingesta de carbohidratos (mediante entrada manual o APIs de bases de datos de alimentos) y el registro de las dosis de insulina administradas por el usuario. Potencialmente, podría incluir otros factores relevantes como niveles de estrés o calidad del sueño. Una vez recolectados, estos datos heterogéneos requieren un preprocesamiento cuidadoso. Esto incluye la sincronización temporal para alinear eventos con diferentes frecuencias, la limpieza para manejar valores atípicos, la imputación para abordar datos faltantes (considerando incluso los patrones de ausencia como información útil, inspirado en Nguyen [7]), la normalización de valores numéricos y la transformación de eventos discretos (como comidas o inyecciones) en representaciones continuas o vectoriales (embeddings) adecuadas para los modelos de aprendizaje profundo, utilizando técnicas como SSR [6].

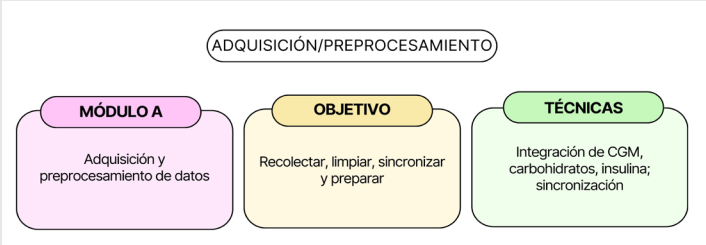


Figura 4. Flujo de trabajo del Módulo A, Adquisición y Preprocesamiento de Datos.
Fuente: Creación Propia.

Módulo B: Motor de Predicción Personalizada

El núcleo predictivo de GPA reside en este módulo, cuya función principal se ilustra en la Figura 5. Su objetivo es generar pronósticos de la trayectoria futura de BGL del usuario para horizontes clínicamente relevantes, típicamente entre 30 y 120 minutos. Para ello, utiliza un modelo de aprendizaje profundo robusto. Este podría ser una arquitectura híbrida que combine las fortalezas de diferentes enfoques (como VMD para descomposición, LSTM para tendencias a largo plazo y Transformers para atención a corto plazo, siguiendo líneas como las de Farahmand [6]) o un modelo pre-entrenado de gran escala adaptado al dominio médico (como los basados en LLM con embeddings específicos, [7]). La personalización es clave: se logra incorporando embeddings que representen las características únicas del usuario (aprendidos durante el entrenamiento o ajuste fino, como en Armandpour [5]) o mediante el fine-tuning del modelo con los datos históricos específicos de ese individuo. Dada la posibilidad de despliegue en dispositivos móviles, la eficiencia computacional es una consideración importante, pudiendo explorarse técnicas como Knowledge Distillation [6], para reducir el tamaño y la carga computacional del modelo sin sacrificar excesiva precisión.

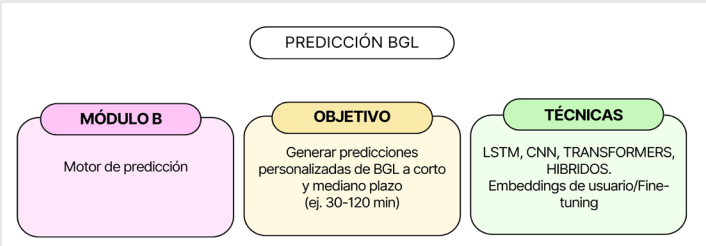


Figura 5. Componentes del Módulo B: Motor de Predicción Personalizada.
Fuente: Creación Propia.

Módulo C: Sugerencia de Dosis Segura

Basándose en las predicciones del Módulo B y el estado actual del usuario, el Módulo C genera recomendaciones de dosis de insulina, como bolos prepandiales o dosis de corrección. La estructura y lógica de este módulo se detallan en la Figura 6. La seguridad

es el principio rector absoluto de este módulo. Toma como entrada la predicción de BGL, el valor actual de BGL, el objetivo glucémico personalizado, las ratios de insulina-carbohidratos (ICR) y el factor de sensibilidad a la insulina (ISF) del usuario, la cantidad de carbohidratos planeada y la insulina activa calculada (IOB). Su lógica combina las fórmulas estándar de dosificación (cálculo de bolo por carbohidratos y factor de corrección) con la posibilidad de un ajuste fino mediante un modelo de machine learning simple, entrenado con datos históricos de dosis-respuesta del usuario (siempre que se disponga de datos suficientes y se valide por expertos). Además, implementa múltiples capas de seguridad para prevenir dosificaciones peligrosas: establece límites máximos y mínimos absolutos para cualquier sugerencia, genera alertas automáticas y bloquea sugerencias si se predice una hipoglucemia severa inminente, considera obligatoriamente la IOB para evitar la acumulación de insulina (stacking), verifica contraindicaciones básicas y, de forma explícita, prioriza evitar la hipoglucemia sobre alcanzar la normoglucemia perfecta, aprendiendo de las limitaciones observadas en LLMs [1],[10]. Cada sugerencia puede ir acompañada de un indicador de confianza que refleje la incertidumbre de la predicción subyacente.

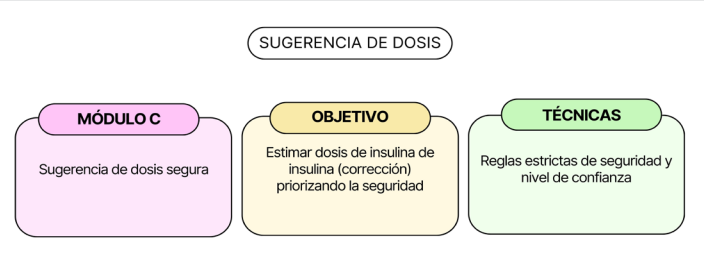


Figura 6. Lógica y capas de seguridad del Módulo C: Sugerencia de Dosis Segura.
Fuente: Creación Propia.

Módulo D: Interfaz de Usuario (UI)

La interacción del usuario con el sistema GPA se produce a través de este módulo, visualizado en la Figura 7, y materializado como una aplicación móvil y/o una plataforma web. Esta interfaz debe presentar de forma clara e intuitiva los datos de BGL actuales e históricos, las predicciones futuras (ej., a 30, 60, 120 min) y las sugerencias de dosis generadas por el Módulo C, junto con cualquier advertencia relevante. Es responsable de generar alertas preventivas basadas en las predicciones, como riesgos inminentes de hipo o hiperglucemia. Adicionalmente, debe facilitar la entrada manual de datos por parte del usuario (comidas, ejercicio, insulina no registrada automáticamente, notas) y permitir la configuración de parámetros personales como objetivos glucémicos y ratios (ICR, ISF). También visualizará las explicaciones proporcionadas por el Módulo E.

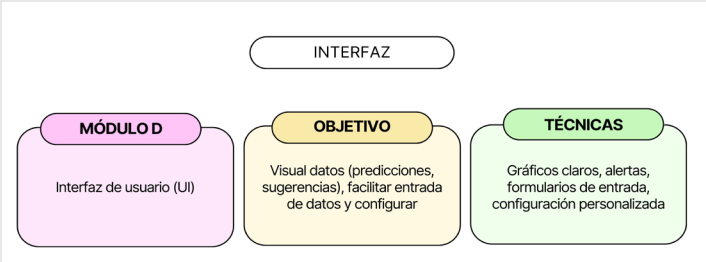


Figura 7: Funcionalidades clave de la Interfaz de Usuario (Módulo D).
Fuente: Creación Propia.

Módulo E: Interacción, Explicación y Supervisión Humana (HITL)

Este módulo cumple un doble propósito vital: facilitar la comprensión del usuario y garantizar una capa esencial de supervisión humana, como se esquematiza en la Figura 8. Para la explicabilidad, utiliza un Modelo de Lenguaje Grande (LLM), preferentemente operando con Recuperación Aumentada por Generación (RAG) para basar sus respuestas en datos y directrices fiables. Este LLM explica las predicciones y sugerencias en lenguaje natural y comprensible, respondiendo a preguntas del usuario sobre sus datos, tendencias o las recomendaciones del sistema. El componente de Supervisión Humana implementa el flujo de trabajo HITL [1]: las sugerencias de dosis consideradas críticas (ej., bolos grandes, correcciones significativas, ajustes pre-ejercicio) requieren una confirmación explícita por parte del usuario antes de ser consideradas como "administradas" dentro del sistema. El usuario siempre conserva la autoridad final, pudiendo modificar o ignorar cualquier sugerencia. Opcionalmente, podría integrarse un flujo para compartir datos y decisiones con un profesional de la salud. Se aplican restricciones de seguridad estrictas al LLM para evitar que genere consejos médicos incorrectos, peligrosos o no solicitados, confirmando su rol principal a la explicación y resumen, no a la generación autónoma de directrices médicas críticas. El sistema también puede incorporar mecanismos para aprender del feedback implícito (confirmación/rechazo de sugerencias) y explícito del usuario o profesional.

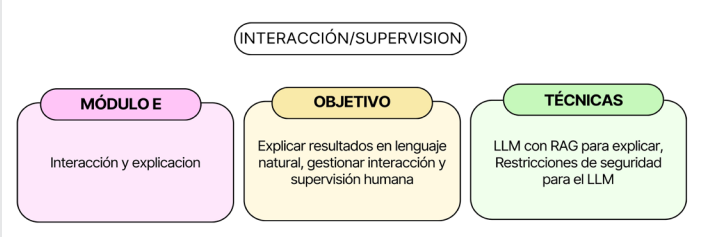


Figura 8. Funcionalidades clave de la Interfaz de Usuario.
Fuente: Creación Propia.

Tabla 1: Comparación de modelos en la predicción de la glucosa sanguínea, asistencia en la dosificación y su seguridad

Enfoque	Generación de Sugerencias de Dosis	Capacidad de Personalización	Seguridad y Supervisión
Métodos tradicionales	No	Baja	No
Deep Learning Base	No	Media	No
Deep Learning Híbrido	No	Alta	No
Modelos LLMs	Si	Alta	Mucho riesgo
Arquitectura GPA	Si	Alta	Prioriza la seguridad

Fuente: Creación propia

RESULTADOS

En complemento a la comparación presentada en la Tabla 1, los hallazgos de esta comparación, revelan la evolución de los modelos de IA y las brechas no cubiertas por los enfoques existentes. A continuación, se detallan los avances logrados por los modelos de Deep Learning y las limitaciones de los LLMs para contextualizar el valor de la Arquitectura GlucoPredictAssist (GPA) como una solución innovadora que integra predicción y seguridad en la dosificación.

Los modelos de aprendizaje profundo (LSTM, CNN-LSTM, Transformers, modelos híbridos con atención y/o descomposición) superan consistentemente a los métodos tradicionales para la predicción de BGL, especialmente al capturar dependencias temporales complejas y no linealidades [4],[6].

La personalización del modelo mediante embeddings de usuario y ajuste fino es necesaria para mejorar la precisión, dada la alta variabilidad interindividual [5],[7].

Asimismo, la integración de datos multimodales (CGM, carbohidratos, insulina, actividad, etc.) mejora la predicción, pero requiere técnicas robustas para manejar la irregularidad, dispersión y diferentes frecuencias de muestreo [6],[7]. En este contexto, las técnicas de atención y la descomposición de señales como VMD son útiles para analizar cómo los niveles de glucosa dependen de eventos pasados y para modelar dependencias a largo plazo [5],[6]; sin embargo, la eficiencia computacional es un factor importante para la implementación en tiempo real, y técnicas como Knowledge Distillation o arquitecturas optimizadas son relevantes [6].

Por su parte, los LLMs ofrecen nuevas vías para la interacción, explicación, educación y potencial asistencia en la toma de decisiones [10],[1]. Sin embargo, su aplicación directa en tareas numéricas críticas como la predicción BGL o la dosificación de insulina presenta riesgos significativos de errores y seguridad [1],[8],[10] y exige extrema precaución, validación rigurosa y, preferiblemente, supervisión humana (HITL)[1].

Aunque la arquitectura GlucoPredictAssist (GPA) permanece en fase conceptual y aún no se ha evaluado con usuarios reales, se ha trazado una ruta ético-regulatoria acorde con la normativa mexicana vigente. Al no involucrar sujetos humanos ni datos personales identificables, esta etapa preliminar no requiere la revisión formal de un Comité de Ética en Investigación; sin embargo, se aconseja solicitar una "carta de exención" o "no objeción" al CEI institucional para respaldar la trazabilidad del proyecto y preparar su transición a fases posteriores. De manera complementaria, se han considerado el marco de protección de datos personales (LFPDPPP) y las disposiciones de la NOM-004-SSA3-2012 para expedientes clínicos, así como las regulaciones aplicables a software como dispositivo médico (SaMD) reconocidas por COFEPRIS —en particular la NOM-241-SSA1-2021 y el Suplemento 5.0 de la Farmacopea de México. En caso de implementarse clínicamente, GPA deberá contar con protocolo aprobado por CEI, notificación o autorización sanitaria correspondiente y validaciones técnicas y clínicas conforme a estándares nacionales e internacionales (IMDRF, OMS, FDA).

Discusión

La revisión de la literatura confirma la superioridad de los modelos de aprendizaje profundo (LSTM, Transformers, arquitecturas híbridas) sobre métodos tradicionales para la predicción de BGL, gracias a su capacidad para modelar las complejas dinámicas temporales y no lineales de la glucosa. La personalización (embeddings, fine-tuning) y la integración robusta de datos multimodales (CGM, carbohidratos, insulina, actividad) surgen como factores cruciales para mejorar la precisión predictiva, aunque presentan desafíos técnicos relacionados con la heterogeneidad y dispersión de los datos.

Si bien los LLMs muestran un potencial considerable para mejorar la interacción, explicación y educación del paciente, su aplicación directa en tareas numéricas críticas como la predicción BGL o la sugerencia de dosis de insulina conlleva riesgos significativos de seguridad y precisión. El principal problema identificado es la falta de sistemas que integren de forma fiable y segura predicciones precisas con recomendaciones de dosificación personalizadas y accionables.

La propuesta arquitectónica, GlucoPredict-Assist, busca abordar esta brecha combinando modelos predictivos avanzados, potencialmente Transformer, con un módulo de sugerencia de dosis diseñado con estrictas reglas de seguridad como consideración de IOB, priorización de evitación de hipoglucemia y un enfoque HITL. Se propone el uso de LLMs, específica-

mente con RAG, para tareas de explicación y soporte a la interacción, pero no para la generación directa de recomendaciones médicas críticas, mitigando así los riesgos identificados.

CONCLUSIONES

Este trabajo propone la arquitectura GlucoPredictAssist (GPA), que vincula la predicción personalizada de BGL con la generación de sugerencias de dosificación bajo salvaguardas clínicas (guardrails) y supervisión humana (HITL). La aportación principal es conectar de forma explícita la predicción con un mecanismo de dosificación seguro, trazable y personalizable, operable en entornos reales mediante monitoreo y recalibración. Además, el papel de los LLMs se limita a funciones de explicación y verificación, evitando su uso directo en tareas numéricas críticas. Hasta donde alcanza nuestra revisión, no identificamos propuestas que integren simultáneamente predicción personalizada, dosificación con salvaguardas clínicas y operación con monitoreo y recalibración bajo supervisión humana.

La propuesta permanece en fase conceptual. Como trabajo futuro se requiere validación clínica prospectiva, evaluación de seguridad (p. ej., reducción de hipoglucemias), usabilidad y factores humanos, y pruebas de generalización entre perfiles de pacientes y contextos de uso. Estos pasos definirán su madurez y posible adopción en práctica clínica.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Pavon, J. M., Schlientz, D., Maciejewski, M. L., Economou-Zavlanos, N., & Lee, R. H. (2025). Large language models in diabetes management: The need for human and artificial intelligence collaboration. Diabetes Care, 48(2), 182–184.

[2] Healey, E., Tan, A. L. M., Flint, K. L., Ruiz, J. L., & Kohane, I. (2024). A case study on using a large language model to analyze continuous glucose monitoring data. Scientific Reports, 14(1), 1143.

[3] Martinsson, J., Schliep, A., Eliasson, B., & Mogren, O. (2020). Blood glucose prediction with variance estimation using recurrent neural networks. Journal of Healthcare Informatics Research, 4, 1-18.

[4] Rabby, M. F., Tu, Y., Hossen, M. I., Lee, I., Maida, A. S., & Hei, X. (2021). Stacked LSTM based deep recurrent neural network with Kalman smoothing for blood glucose prediction. BMC Medical Informatics and Decision Making, 21, 1-15.

[5] Armandpour, M., Kidd, B., Du, Y., & Huang, J. Z. (2021). Deep personalized glucose level forecasting using attention-based recurrent neural networks. arXiv preprint arXiv:2106.00884v2.

[6] Farahmand, E., Soumma, S. B., Chatrudi, N. T., & Ghasemzadeh, H. (2024). Hybrid attention model using feature decomposition and knowledge distillation for blood glucose forecasting. arXiv preprint arXiv:2403.10703.

[7] Nguyen, P. B. H., Hungele, A., Holl, R. W., & Menden, M. P. (2025). Leveraging pretrained large language model for prognosis of type 2 diabetes using longitudinal medical records [Preprint]. medRxiv.

[8] Hulman, A., Dollerup, O. L., Mortensen, J. F., Fenech, M. E., Norman, K., Støvring, H., & Hansen, T. K. (2023). ChatGPT- versus human-generated answers to frequently asked questions about diabetes: A Turing test-inspired survey among employees of a Danish diabetes center. PLoS ONE, 18(8), e0290773.

[9] Wang, D., Liang, J., Ye, J., Li, J., Li, J., Zhang, Q., ... Zheng, Y. (2024). Enhancement of large language models' performance in diabetes education: Retrieval-augmented generation approach. JMIR Preprints, 58041. doi: 10.2196/preprints.58041.

[10] Mondal, A., & Naskar, A. (2024). Evaluating the effectiveness and safety of large language model in generating type 2 diabetes mellitus management plans: A comparative study with medical experts based on real patient records [Preprint]. medRxiv.

[11] Schaaruup, J. R., Isaksen, A. A., Norman, K., Bjerg, L., & Hulman, A. (2025). Trust in large language model-based solutions in healthcare among people with and without diabetes: A cross-sectional survey from the Health in Central Denmark cohort [Preprint]. medRxiv.

RII CIREDII 2024