TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LERDO

VOLUMEN: 2. NÚMERO: 12. AÑO: 2026

REVISTA DIGITAL UNIVERSITARIA · ISSN: 2448-623X · PUBLICACIÓN ANUAL

REVISTA CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO

EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE DURANGO

COECYT

Crossref

latindex

https://www.lerdo.tecnm.mx http://revistacid.itslerdo.edu.mx

REVISTA CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO © 2024 by Instituto Tecnológico Superior de Lerdo is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC BY

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO®

REVISTA CIENCIA INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO

Título: CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO

Editor: TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO / INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LERDO

Año: 2026

Volúmen: 2

Número: 12

Publicación: Octubre 2026

Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo. Octubre 2026, Volumen 1, Número 12. Publicación digital universitaria nacional anual, editada por el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Dgo. Dirección: Avenida Tecnológico No. 1555 Sur. Periférico Gómez-Lerdo, Km. 14.5. C.P. 35150. Ciudad Lerdo, Durango. México. Teléfono: (+52) 871 725 23 71, extensión 134. Correo electrónico y página web de la revista: revistacid@itslerdo.edu.mx | http://revistacid.itslerdo.edu.mx

Número de reserva de derechos al uso exclusivo: 04-2026-062413065000-102; otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor (Indautor). Directora: Dra. Karla Verónica Rodríguez Lozano. Editor Responsable: Dra. Elizabeth Macías Cortés. Diseño de portada: Dr. Juan Martín Arzola Monreal. Responsable de la última actualización de este número: Comité Editorial del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.

La opinión expresada en los artículos firmados es responsabilidad del autor. Se autoriza la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes siempre y cuando se cite la fuente, y que no sea con fines de lucro. No nos hacemos responsables por textos no solicitados. Fecha de última actualización: Octubre de 2026.

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LERDO
REVISTA CIENCIA INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO

COMITÉ CIENTÍFICO INTERNO

PRESIDENTE EDITORIAL:
Dr. José Dimas López Martínez
https://orcid.org/0000-0003-0545-5904

SECRETARIO DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN:
Dr. Jesús Alejandro Valdés Nieblas
https://orcid.org/0009-0000-8184-3349

DIRECTORA:
Dra. Karla Verónica Rodríguez Lozano
https://orcid.org/0000-0003-2832-4165

EDITOR RESPONSABLE:
Dra. Elizabeth Macías Cortés
https://orcid.org/0000-0003-4536-3588

COMITÉ CIENTÍFICO EXTERNO

Dr. Ignacio Villanueva Fierro
CIIDIR-IPN Unidad Durango
https://orcid.org/0000-0001-7751-9271

Dr. Rubén Francisco González Laredo
Instituto Tecnológico de Durango TecNM
https://orcid.org/0000-0001-6329-1413

Dra. Gabriela Ramos Clamont Monfort
Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A. C. Unidad Hermosillo
https://orcid.org/0000-0001-8685-6421

Dra. María Eugenia Mena Navarro
Universidad Iberoamericana León
https://orcid.org/0000-0001-9081-0485

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LERDO 1995
REVISTA CIENCIA INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO

COMITÉ EDITORIAL

DIRECTORA:
Dra. Karla Verónica Rodríguez Lozano
https://orcid.org/0000-0003-2832-4165

EDITOR RESPONSABLE:
Dra. Elizabeth Macías Cortés
https://orcid.org/0000-0003-4536-3588

ARTE, DISEÑO Y SUPERVISIÓN TÉCNICA:
Dr. Juan Martín Arzola Monreal
https://orcid.org/0000-0002-5829-7818

SUPERVISORA DE DISEÑO WEB:
Dra. Maria Guadalupe Flores Luevanos
https://orcid.org/0000-0003-2613-1431

COMITÉ DE ÉTICA EDITORIAL:
Dra. Mayela García Andrade
https://orcid.org/0000-0002-7343-9220

Dr. Javier Isaac Contreras Ramírez
https://orcid.org/0000-0002-4408-052X

ÁREA FILOLOGÍA:
Dra. Elda Moreno Núñez
https://orcid.org/0000-0002-5912-082X

M.C. Silvia Adriana Jáquez Cervantes
https://orcid.org/0009-0005-2804-865X

Dra. Silvia Adriana Vidaña Martínez Instituto
https://orcid.org/0009-0008-9633-1010

Dra. Tania Elizabeth Velásquez Chávez
https://orcid.org/0009-0009-7788-1786

ÁREA DE TRADUCCIÓN:
Dr. Alan Joel Servín Prieto
https://orcid.org/0000-0002-5534-7875

M.D. José María Juárez Hernández
https://orcid.org/0009-0009-5790-651X

Dr. José Luis Nolasco Alvarado
https://orcid.org/0009-0004-7495-2554

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO®

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LERDO
LA EXCELENCIA ACADÉMICA AL SERVICIO DE LA SOCIEDAD
1995

REVISTA CIENCIA
INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO

COMITÉ REVISOR

Aarón Sifuentes Machado, Adriana Margarita González Márquez, Alan Joel Servín Prieto, Alfredo Orlando Hassán Barrón Quintero, Ana Ernestina Poblano Ojinaga, Antonio Mendoza Ruelas, Antonio Meza Arellano, Ariel Gonzalez Fuentes, Arturo Serrano Hernández, Blanca Gisela Martinez Flores, Brenda Carrera Barraza, Cecilia Inés Calderón Ibarra, Claudia Patricia Fernández de Lara Arcos, Cyntia Iurhuari García Félix, Daniela Adriana Sánchez Vizcarra, David Contreras López, Diego Alberto Román Landeros, Eduardo Machado Díaz, Elda Moreno Núñez, Elena Tzetzangary Aguirre Mejia, Elizabeth Macías Cortés, Elva Patricia Reyes Diaz, Francisco Mauro Salgado Garza, Gerardo de Jesús Garza Rosales, Hilda Haydee Chairez Hernandez, Irma Tinoco Alcázar, Iván Ramón Rivera Rocha, Jacqueline Zapata Vazquez, Jessica Lizbeth Coria Arellano, Jesús Alejandro Valdés Nieblas, Jorge Lara Cardoso, Jose Adan Silva Hernandez, José Ángel Candelas Saucedo, José Dolores Ruiz Ayala, José María Juárez Hernández, Juan Carlos Hernández Valenzuela, Juan Martín Arzola Monreal, Juana María Nájera Ibarra, Julia Patricia Melo Morín, Karla Verónica Rodríguez Lozano, Lilibet Mendoza Wong, Luis Alejandro Contreras Pinto, Luis Amado Gonzalez Vargas, Luis Ricardo Ovalle Gamboa, Manuel Juan Güereca Tijerina, María Guadalupe Flores Luévanos, María Luisa López Roa, Martha Beatriz Santa Ana Escobar, Martha Elena Pulido, Melissa Edith Salazar Echeagaray, Mercedes Georgina Ramírez Aragon, Miguel Angel Burruel Valencia, Miriam Olvera Cueyar, Mónica Meneses Soto, Nancy Gabriela Marin Castañeda, Nancy Victoria Torres Ramos, Nayla Berenice Muñoz Euan, Noe Alvarado Tovar, Omar Rodolfo Martínez de la Cruz, Oscar Huizar Vargas, Percival Inti Serrato Hernandez, Raul Abdiel Escobedo Garcia, Rodrigo Oliver Delgado Arcega, Rosa María Morales Flores, Ruth de La Peña Martínez, Silvia Adriana Jáquez Cervantes, Silvia Adriana Vidaña Martínez, Sulma Monica Flores Rivas, Tania Elizabeth Velásquez Chávez, Tonatzin Isabel Campino Aguirre, Veronica Cervantes Cardoza, Víctor Edi Manqueros Aviles, Victor Ilich Mirón Orozco, Victoria Jared Borroel García.

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO®

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LERDO
LA EXCELENCIA ACADÉMICA AL SERVICIO DE LA SOCIEDAD
1995

REVISTA CIENCIA
INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO

CARTA DEL EDITOR

Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo (CID TecLerdo)
Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Durango, México.
Tecnológico Nacional de México - TecNM Lerdo.

DR. JOSÉ DIMAS LÓPEZ MARTÍNEZ
PRESIDENTE DEL GRUPO EDITORIAL DE LA REVISTA CID TECLERDO

Ciudad Lerdo, Durango. México. Octubre de 2026.

A nuestra apreciada comunidad académica, científica, tecnológica y empresarial:

Es un honor dirigirme a ustedes a través de una nueva edición de la Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo (CID TecLerdo), un espacio que reafirma nuestro compromiso con la generación, difusión y aplicación del conocimiento al servicio de la sociedad.

Vivimos una época de profundas transformaciones. La inteligencia artificial, la ciencia de datos, la automatización, la transición energética, la sustentabilidad ambiental y la transformación digital están redefiniendo la manera en que producimos, aprendemos, investigamos y resolvemos los desafíos de nuestro tiempo. En este contexto, las instituciones de educación superior tenemos la responsabilidad de impulsar una ciencia cercana a las personas, una ingeniería con sentido humano y una innovación orientada al bienestar colectivo.

La Comarca Lagunera, el Estado de Durango y nuestro país enfrentan retos estratégicos que demandan soluciones sustentadas en evidencia científica y desarrollo tecnológico. Temas como la gestión eficiente del agua, la seguridad alimentaria, la productividad del sector agroindustrial, la energía limpia, la manufactura avanzada, la movilidad inteligente y la formación de capital humano altamente especializado requieren del trabajo colaborativo entre gobierno, academia, sector productivo y sociedad.

En el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Dgo., creemos firmemente que la investigación no debe permanecer únicamente en los laboratorios o en las publicaciones especializadas; debe transformarse en conocimiento útil, en propuestas viables y en soluciones que contribuyan al desarrollo económico, social y ambiental de nuestra región. Por ello, esta revista continúa consolidándose como un foro abierto para compartir resultados de investigación, experiencias innovadoras, desarrollos tecnológicos y proyectos con impacto real.

La amplia participación y el elevado número de artículos recibidos durante este año nos han permitido ampliar el alcance de nuestra publicación. Por ello, de manera especial, este número de nuestra revista CID TecLerdo estará integrado por dos volúmenes, con el propósito de dar cabida a las contribuciones seleccionadas y fortalecer la difusión del trabajo científico y tecnológico de nuestra comunidad.

Durante este año hemos fortalecido nuestra visión editorial promoviendo la calidad científica, la ética en la investigación, la transparencia de los procesos de evaluación y la visibilidad internacional de las contribuciones publicadas. Nuestro objetivo es seguir construyendo una revista sólida, confiable y pertinente, que represente dignamente el esfuerzo de investigadoras, investigadores, docentes, estudiantes y profesionistas comprometidos con la generación de conocimiento.

Como parte de este compromiso y en favor de la mejora continua, a partir de 2027 nuestra revista implementará dos cambios importantes que fortalecerán su dinámica editorial y su compromiso con la comunidad científica.

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO®

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LERDO
LA EXCELENCIA ACADÉMICA AL SERVICIO DE LA SOCIEDAD
1995

REVISTA CIENCIA
INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO

En primer lugar, transitaremos de un modelo de publicación anual a uno de publicación continua, lo que nos permitirá recibir contribuciones durante todo el año y agilizar la difusión de los resultados de investigación. En segundo lugar, adoptaremos el modelo de Acceso Abierto Diamante, el cual elimina por completo los costos de publicación para los autores, garantizando que tanto las personas autoras como las lectoras puedan acceder a los contenidos sin costo alguno. Con estas acciones, reafirmamos nuestra convicción de que el conocimiento científico debe ser un bien accesible para todas las personas y ratificamos nuestro compromiso con la democratización del conocimiento, la equidad en la comunicación científica y el acceso universal, libre y gratuito al conocimiento.

Agradezco profundamente a las autoras y autores que han confiado sus trabajos a nuestra revista, a las personas revisoras por su invaluable labor académica y al Comité Editorial por su dedicación permanente. Su esfuerzo colectivo permite que CID TecLerdo continúe creciendo y fortaleciendo su presencia dentro de la comunidad científica y tecnológica.

Los invito a seguir participando activamente en este proyecto editorial, compartiendo investigaciones, experiencias y propuestas que contribuyan a construir un futuro más sustentable, competitivo e incluyente para nuestra región y para México.

Que cada artículo publicado en estas páginas sea una oportunidad para aprender, innovar y transformar nuestro entorno. Porque cuando la ciencia genera conocimiento, la ingeniería construye soluciones y el desarrollo impulsa bienestar, avanzamos juntos hacia una sociedad más preparada para enfrentar los desafíos del mañana.

Con aprecio y reconocimiento,

ATENTAMENTE

"LA EXCELENCIA ACADÉMICA AL SERVICIO DE LA SOCIEDAD"

DR. JOSÉ DIMAS LÓPEZ MARTÍNEZ

DIRECTOR GENERAL Y REPRESENTANTE LEGAL DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LERDO, DGO.

PRESIDENTE DEL GRUPO EDITORIAL DE LA REVISTA CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO "CID TECLERDO"

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

REVISTA CIENCIA INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO

ÍNDICE DE ARTÍCULOS

01. Diseño e Implementación de KG-RAG Dinámico: Una Extensión del Paradigma RAG con Memoria Persistente mediante Grafo de Conocimiento Bitemporal 1
Caldera-Sánchez, Christian Javier.

02. Sistema IoMT Hospitalario para Monitoreo de Pacientes en Tiempo Real 12
Castro-Zenil, Mario Salvador; Peñaloza-Mendoza, Guillermo Rey; Carreón-Silva, Luis Miguel.

03. Estrés Laboral y Salud Mental: Factores de Riesgo en los Docentes del TecNM campus Zacatecas Occidente 22
Rodríguez-Martínez, Danna Montserrat; Ceseñas-Cordero, María Guadalupe; Cuevas-Zapata, Jessica Ivón; Ceceñas-Jacquez, Marco Iván; Guzmán-Ayala, Ana Laura.

04. Evaluación del Impacto de Generación Distribuida Fotovoltaica y Almacenamiento en Baterías en el Perfil de Tensión de una Red de Distribución IEEE de 34 Nodos 31
Martínez-Álvarez, María Montserrat; Muñoz-Castillo, Rubén Ángel; Hernández-Flores, Concepción; Arjona-López, Marco Antonio.

05. Plan de Negocios para Industrializar Trucha Arcoíris en la Región de Valle de Bravo 41
González-Flores, Adalberto; Hernández-Sánchez, Josefina; Santos-García, Adrián.

06. Evaluación Comparativa de YOLOv8, YOLOv11 y YOLOv26 para la Detección Automática de Mosquitos y Larvas de Aedes aegypti 50
Campa-Ramírez, Edson Raúl; González-Vargas, Luis Amado; Alvarado-Tovar, Noé; Vidaña-Martínez, Silvia Adriana; Hernández-Rodríguez, Rubén.

07. Diagnóstico y Mejora del Rendimiento de Equipos de Cómputo en un Laboratorio Escolar: Evidencia Experimental y Percepción Estudiantil en la Escuela Primaria 60
Ramírez-Sánchez, Víctor Andrés; Ojeda-Núñez, Martha Iveth; Gutiérrez-Montoya, José Eduardo; Jurado-Bichir, Lorena Elizabeth; Hernández-Cuevas, Alberto Adrian.

08. Reducción de Tiempos del Proceso de Maquinado Aplicando el Trabajo Estandarizado en una Empresa Fabricante de Componentes Metálicos para Automoción en La Laguna de Durango 68
Martínez-Mendoza, Alma Fabiola; Martínez-Macías, Gerardo Alfredo.

09. Evaluación del Conocimiento, Uso y Percepción de la Inteligencia Artificial en Estudiantes de Educación Secundaria 78
Ojeda-Núñez, Martha Iveth; Ramírez-Sánchez, Víctor Andrés; Gutiérrez-Montoya, José Eduardo; Jurado-Bichir, Lorena Elizabeth; Montelongo-Bocanegra, Jonatan Leonel.

10. Diseño, Ensamble y Validación Preliminar de un Microsensor Térmico ToF en Tecnología TFS20 para Aplicaciones Hidrométricas 86
Coto-Fuentes, Hesner; González-Aroña, Itzel Sarahim; Guevara-Amatón, Karla Victoria.

11. Evaluación de la Percepción del Uso de Realidad Aumentada como Método Odontológico 97
Palomares-Ibarra, Karen Adriana; Reyna-Jiménez, María Guadalupe; Navarro-Villalobos, Mauricio; Favela-Flores, Sergio; Delgadillo-Delgadillo, Zoila.

12. AtenPsi: Diseño e Implementación de un Sistema Web para la Gestión Integral de la Atención Psicológica Estudiantil en Educación Superior 107
Rodríguez-Campos, Francisco Eduardo; Rodríguez-Lozano, Karla Verónica; Flores-Luévanos, María Guadalupe; García-Bautista, José Armando; Herrera-García, José Carlos.

13. Google Earth Engine (GEE) como Herramienta de Procesamiento y Análisis de Datos del Satélite Sentinel-5P 119
Servín-Prieto, Alan Joel; Velasquez-Chavez, Tania Elizabeth; Juárez-Hernández, José María; Hernández-López, Mónica; Vásquez-Corral, Marcial Humberto.

14. Análisis Comparativo Sentinel-2 vs Sequoia en la Estimación de ETc Basada en NDVI 127
Servín-Prieto, Alan Joel; Juárez-Hernández, José María; Hernández-López, Mónica; Velásquez-Chávez, Tania Elizabeth; Adame-Delgado, Raymundo.

15. Simulador Web Educativo de Negocios 136
Morales-Venegas, Diana Sarahi; Rodríguez-Chacón, Rocio Lorena; Morales-Flores, Rosa María; Tinoco-Alcázar, Irma; Rodríguez-Campos, Francisco Eduardo.

16. Implementación de Buenas Prácticas de Manufactura y Gestión de Indicadores en la Industria del Diseño y Empaque 146
Gaucin-Delgado, Alejandra; Morales-Flores, Rosa María; Flores-Rivas, Sulma Mónica; Fong-Alvarado, Mayela.

17. Diseño e implementación de máquina semiautomática para optimizar el proceso de soldadura mediante Lean Manufacturing 154
Jurado-Zamarripa, Laura Isela; Valdez-Díaz, José Manuel; Martínez-Rodríguez, Olga Lidia; Adame-Delgado, Raymundo; Carrera-Barraza, Brenda.

18. Aplicación de PEPS para Reducir la Merma en un Almacén de Alimentos del Sector Cinematográfico 163
Gasca-Ortega, Lizzy Yaretzi; Huizar-Vargas, Oscar; García-Hernández, Violeta del Carmen; Salas-Rodríguez, Diana Rosa.

19. Minería de Datos y Analítica Visual para la Gestión Integral de Trayectorias Escolares en Ingeniería: Un Enfoque de Design Science Research 173
Machado-Díaz, Eduardo; Serrano-Hernández, Arturo; Román-Landeros, Diego Alberto.

20. La Importancia de la Evaluación Educativa en la Región Laguna, Durango: Fundamentos Técnicos y Evidencia Empírica del Pilotaje 2025-2026 184
Adame-de-León, Fernando Ulises; Moreno-Núñez, Elda; Garza-Rosales, Gerardo de Jesús; Miranda-Guardado, César; García-Morales, Olivia.

21. Diseño e Implementación de un Protocolo de Preparación y Sensibilización Escolar para la Reincorporación integral de Alumnos en Duelo 193
Cabrales-Valenzuela, Adán Emilio; Moreno-Núñez, Elda; Garza-Rosales, Gerardo de Jesús; Vargas-Lerma, Jorge Fernando.

22. Diseño y Construcción de una Máquina Semiautomática para el Corte de Embutidos en Cubos Uniformes 204
Vaquera-González, Efraín.

23. Claridad Vocacional y Propósito Universitario en Estudiantes de una Universidad en la Laguna 212
Armendáriz-López, Saúl; Chairez-Fernández, Luis Felipe; Regalado-Ríos, María Guadalupe; Caldera-Rodríguez, Omar Israel; Torres-Camarillo, Gabriela.

24. Efecto de Lixiviado de Vermicompost Enriquecido con Trichoderma Viride en el Crecimiento del Tomate 220
Velásquez-Chávez, Tania Elizabeth; Servín-Prieto, Alan Joel; Hernández-López, Mónica; Vásquez-Corral, Marcial Humberto; Juárez-Hernández, José María.

25. Diseño y Validación de un Instrumento para Evaluar Necesidades Comunicativas en Autismo No Hablante desde la Perspectiva de Personas Cuidadoras 229
Valenzuela-Martínez, Patricia Abigail; Rodríguez-Chacón, Rocio Lorena.

26. Evaluación de la Severidad de Fallas y su Acoplamiento con la Dinámica Postfalla para la Priorización de Generadores Críticos en Estudios de Estabilidad Transitoria 238
Sellschopp-Sánchez, Francisco Sergio; Ruiz-Ponce, Gerardo; Lozano-Cuéllar, Leticia.

27. Determinación de Factores Asociados a Prácticas de Consumo de Agua: Estudio sobre Hábitos en Estudiantes Universitarios 250
Morales-López, Jesús Enrique; Ruiz-Arroyo, Idalia; Álcala-Wong, Daniel; Ruiz-Ayala, José Dolores; Aguirre-Mejía, Elena Tzetzangary.

28. Estudio Paramétrico para la Mejora de la Respuesta Dinámica de un Inversor Fotovoltaico Conectado a la Red Mediante el Lugar Geométrico de las Raíces 258
Camacho-Sifuentes, Rita Guadalupe; Sellschopp-Sánchez, Francisco Sergio; Ruiz-Ponce, Gerardo Enrique.

29. Evaluación del Impacto del Servicio al Cliente en la Fidelización de Usuarios: Un Análisis del Soporte Técnico Remoto en Entornos de Manufactura Avanzada 268
Ochoa-Corona, Yisvi Saray; Ramos-Ochoa, Oscar Fabián; Ruiz-Arroyo, Idalia; Martínez-Rodríguez, Ulises.

30. Identificación de Dificultades de Aprendizaje en Álgebra Lineal mediante Modelos Predictivos de Machine Learning 276
Campino-Aguirre, Tonatzin Isabel; Moreno-Núñez, Elda; Rodríguez-Lozano, Karla Verónica.

31. Controladores Adaptables Robustos para Regular la Altitud de un Dron Tipo Quadrotor 285
Espinoza-Fraire, Arturo Tadeo; Nájera-Pérez, Abel; Betancourt-Chávez, Julio Roberto; Sáenz-Esqueda, José Armando.

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Diseño e Implementación de KG-RAG Dinámico: Una Extensión del Paradigma RAG con Memoria Persistente mediante Grafo de Conocimiento Bitemporal

Design and Implementation of Dynamic KG-RAG: Extending the RAG Paradigm with Persistent Memory through a Bitemporal Knowledge Graph

Caldera-Sánchez, C. J.[1]

Datos de Adscripción:
[1] ✉Caldera Sánchez, Christian Javier
Narvalla Innovación S.A.P.I. de C.V. Gómez Palacio, Durango. Mexico.
christian.caldera@outlook.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2638-9737

Resumen **- Los sistemas de Generación Aumentada por Recuperación (RAG) permiten consultar fuentes externas para generar respuestas fundamentadas; sin embargo, carecen de mecanismos para actualizar el conocimiento entre interacciones, lo que limita su personalización y continuidad a largo plazo. Este artículo presenta el diseño e implementación de un motor de memoria persistente multicapa, denominado KG-RAG Dinámico, que extiende este paradigma mediante la incorporación de memoria dinámica basada en un grafo de conocimiento bitemporal. El objetivo es desarrollar una arquitectura capaz de retener, estructurar y recuperar conocimiento a través de sesiones independientes. Para ello, se siguió un enfoque en cuatro fases: revisión del estado del arte, definición arquitectónica, implementación y validación experimental. La propuesta organiza la memoria en tres capas: transcripciones brutas inmutables, un grafo bitemporal que modela entidades, relaciones y su evolución en el tiempo, y una capa de recuperación híbrida que integra búsqueda semántica mediante embeddings, búsqueda léxica y recorrido de grafo. El contexto recuperado se inyecta sistemáticamente antes de la generación de respuestas. El grafo se construye de forma automática y asíncrona mediante un pipeline de extracción de entidades y relaciones, eliminando la necesidad de indexación manual. Los resultados muestran una recuperación consistente de contexto entre sesiones y una representación coherente de hechos cambiantes en el tiempo. La viabilidad se valida mediante un prototipo implementado como agente conversacional. Se concluye que KG-RAG Dinámico amplía eficazmente el paradigma RAG y es aplicable a sistemas que requieren memoria estructurada, persistente y evolutiva.**

Palabras Clave **- Grafo de Conocimiento Bi-temporal, KG-RAG Dinámico, Memoria Persistente Dinámica, Modelos de Lenguaje, Recuperación Híbrida, Sistemas de Inteligencia Artificial.**

Abstract **- Retrieval-Augmented Generation (RAG) systems allow querying external sources to generate grounded responses; however, they lack mechanisms to update knowledge between interactions, limiting long-term personalization and continuity. This article presents the design and implementation of a multi-layer persistent memory engine called Dynamic KG-RAG, which extends this paradigm by incorporating dynamic memory based on a bitemporal knowledge graph. The objective is to develop an architecture capable of retaining, structuring, and retrieving knowledge across independent sessions. To this end, a four-phase approach was followed: state-of-the-art review, architectural definition, implementation, and experimental validation. The proposal organizes memory into three layers: immutable raw transcripts, a bitemporal graph that models entities, relationships, and their evolution over time, and a hybrid retrieval layer that integrates semantic search through embeddings, lexical search, and graph traversal. Retrieved context is systematically injected before response generation. The graph is built automatically and asynchronously through an entity and relationship extraction pipeline, eliminating the need for manual indexing. Results show consistent context retrieval across sessions and coherent representation of facts changing over time. Viability is validated through a prototype implemented as a conversational agent. It is concluded that Dynamic KG-RAG effectively extends the RAG paradigm and is applicable to systems requiring structured, persistent, and evolving memory.**

Keywords **- Bitemporal Knowledge Graph, Dynamic KG-RAG, Dynamic Persistent Memory, Hybrid Retrieval, Intelligent Systems, Language Models.**

I. INTRODUCCIÓN

Los modelos de lenguaje de gran tamaño (Large Language Model, LLM) permiten a los sistemas de software generar interfaces de usuario basadas en lenguaje natural. Su uso se ha extendido a agentes de inteligencia artificial conversacionales que permiten ejecutar lógica y herramientas de forma no lineal. Estos agentes son de gran utilidad para interactuar con sistemas externos y automatizar procesos.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID008

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Sin embargo, estos sistemas cuentan con grandes desventajas conocidas, como lo son: alucinaciones (inventan información falsa), falta de información actualizada, privacidad de datos, mínima o nula retención de información entre sesiones de trabajo, entre otras. Para estos cuatro problemas en particular, se han propuesto diferentes alternativas de contención, una de ellas son los sistemas de Recuperación Aumentada por Generación (Retrieval-Augmented Generation, RAG). Los sistemas RAG permiten el procesamiento y almacenamiento de fragmentos de texto en forma de vectores semánticos (embeddings) para su futura recuperación y generación de respuestas mediante el uso de LLMs, permitiendo así la reducción de alucinaciones, actualización y extensión de información almacenada, además de mantener la información dentro de la infraestructura de la organización.

Sin duda los sistemas RAG son de gran ayuda para mitigar algunas de las desventajas de los LLMs; sin embargo, este tipo de sistemas también tiene límites. Al depender exclusivamente de búsqueda por similitud semántica, su efectividad disminuye a medida que crece la cantidad de información almacenada: entre más documentos hay, más probable es que el sistema recupere fragmentos irrelevantes en lugar de los correctos (Reimers y Gurevych, 2021). Además, estos sistemas dependen fuertemente de la calidad de los datos ingresados y presentan falta de jerarquías y límites de las ventanas de contexto.

Aunque los sistemas RAG cumplen bien su función de procesar documentos para su futura recuperación, se ven limitados en escenarios donde la conversación activa y la memoria de hechos concretos toman relevancia central. Allí, la recuperación por similitud semántica resulta insuficiente, y se requiere una arquitectura de memoria distinta: una capaz de almacenar, actualizar y razonar sobre hechos específicos a lo largo del tiempo.

Trabajos recientes han comenzado a abordar esta brecha. MemGPT (Packer et al., 2023) propone una jerarquía de memoria inspirada en sistemas operativos, pero gestiona el almacenamiento como texto plano y fragmentos vectorizados, sin un modelo explícito de entidades y relaciones. Microsoft GraphRAG (Edge et al., 2024) introduce grafos de conocimiento para RAG (KG-RAG), pero construye índices estáticos offline sin capacidad de evolución dinámica. Mem0 (Chhikara et al., 2025) ofrece memoria escalable para agentes en producción, pero sin un modelo temporal explícito que distinga cuándo un hecho fue verdadero de cuándo dejó de serlo. Surveys recientes sobre mecanismos de memoria en agentes LLM (Zhang et al., 2025) organizan el área en torno a operaciones de lectura, escritura y manejo de información, sin tratar el modelo bitemporal como categoría de análisis.

La integración de bitemporalidad, es decir, el seguimiento simultáneo de cuándo un hecho es válido en el mundo real (valid time) y cuándo fue registrado o invalidado en el sistema (transaction time), permanece como un área poco explorada en sistemas conversacionales.

El sistema más cercano a la propuesta presentada en este artículo es Graphiti/Zep (Rasmussen et al., 2025), que emplea un grafo temporal para memoria de agentes con un modelo bitemporal. Sin embargo, difiere en decisiones arquitectónicas fundamentales: requiere un motor de grafos externo (Neo4j por defecto) junto con almacenamiento vectorial separado, lo que introduce complejidad operativa y riesgos de consistencia transaccional; extrae entidades y relaciones sin una descomposición explícita en subtareas especializadas; y depende de que el agente invoque herramientas para acceder a la memoria, en lugar de inyectar el contexto de forma obligatoria antes de la generación. Estas diferencias y sus implicaciones se analizan en detalle en la sección de resultados y discusión de este documento.

Este artículo presenta el diseño e implementación de KG-RAG Dinámico, un motor de memoria persistente multicapa que extiende el paradigma RAG mediante tres contribuciones principales: Un grafo de conocimiento bitemporal que modela la evolución del conocimiento a través del tiempo, un pipeline de extracción automática y asíncrona que construye el grafo sin intervención manual mediante la descomposición en subtareas especializadas, y un mecanismo de recuperación híbrida que fusiona búsqueda semántica, léxica y por grafo con inyección obligatoria de contexto previo a la generación. La viabilidad del sistema se valida mediante un prototipo funcional implementado como agente conversacional, evaluado con un framework de 35 pruebas automatizadas que cubren extracción, recuperación, evolución temporal y normalización de predicados. El código fuente se libera como repositorio público para facilitar la reproducibilidad.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Se presenta a continuación el diseño de arquitectura utilizado para la implementación del sistema.

2.1 Visión General y Stack Tecnológico

KG-RAG Dinámico se implementa como un motor de memoria persistente multicapa orquestado por un agente conversacional denominado Mnemo. El sistema recibe mensajes del usuario, los procesa para extraer conocimiento estructurado de forma asíncrona, y recupera contexto relevante de conversaciones anteriores para inyectarlo antes de cada respuesta. Conceptualmente, el sistema se organiza en tres capas: transcripciones inmutables que conservan el historial completo de mensajes, un grafo de conocimiento bitemporal que estructura entidades y hechos con su evolución temporal, y una capa de recuperación híbrida que fusiona señales semánticas, léxicas y de grafo antes de la generación de respuestas. El prototipo se desarrolló sobre un stack de tecnologías maduras y con gran aceptación en la comunidad de desarrollo de software, priorizando componentes de código abierto y ejecución local donde fuera posible. La Tabla 1 detalla el stack tecnológico completo, mientras que la Figura 1 muestra las interacciones entre las capas y componentes descritos. En las siguientes subsecciones se profundizará en cada uno de los flujos principales del sistema. Adicionalmente, la Figura 2 presenta la interfaz de usuario del agente conversacional del sistema en uso.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID008

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Tabla 1
Tecnologías utilizadas dentro del sistema.

Capa	Tecnología	Rol
Backend API	ASP.NET v9	REST API con streaming SSE
Agente	Anthropic SDK	Tool-use loop con Claude
Base de datos	PostgreSQL v17 + pgvector	Almacenamiento unificado + búsqueda vectorial
Embeddings	Ollama (snowflake-arctic-embed2)	Vectores de 1024 dimensiones, MTEB ~55
NER local	GLiNER (gliner-bi-large-v2.0)	Extracción de entidades
LLM	Claude Sonnet + Opus	Razonamiento, extracción, clasificación semántica
Frontend	Angular v21	SPA con visualización de grafo via Cytoscape.js
Infraestructura	Docker Compose	Orquestación de infraestructura de servicios

Figura 1
Diagrama de componentes del sistema KG-RAG Dinámico.

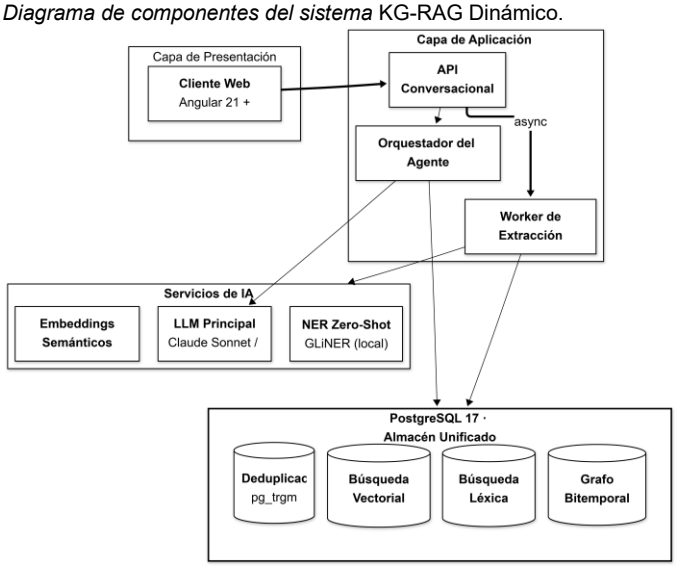
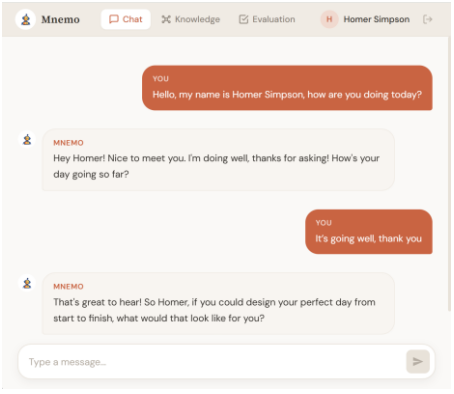


Figura 2
Agente conversacional Mnemo en uso.



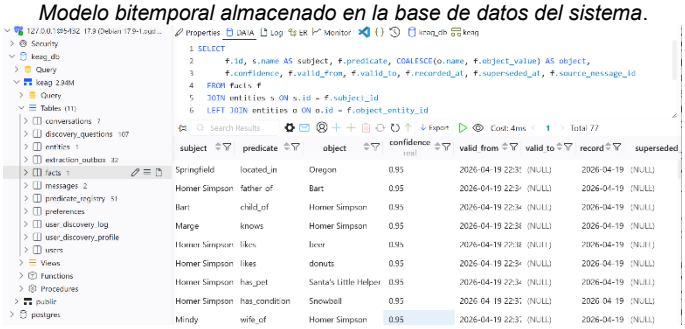
2.2 Modelo de datos bitemporal

El grafo de conocimiento se estructura como tripletas (sujeto, predicado, objeto) donde cada hecho porta cuatro marcas temporales: *valid_from* y *valid_to* representan la vigencia del hecho en el mundo real, *recorded_at* captura el momento de extracción por el sistema, y *superseded_at* registra cuándo un hecho posterior lo reemplazó (*NULL* indica hecho vigente). Este modelo se fundamenta en la distinción entre valid time y transaction time formalizada por Snodgrass y Ahn (1985), e incorporada posteriormente al estándar SQL:2011 como soporte nativo para tablas con periodos de validez y versionado del sistema (Kulkarni y Michels, 2012). En el contexto específico de grafos de conocimiento, Leblay y Chekol (2018) demostraron la viabilidad de este modelo bitemporal sobre 6.7 millones de hechos temporales de Wikidata.

La forma en que un hecho evoluciona depende de si el predicado acepta un solo valor o varios, según lo define el registro de predicados canónicos *predicate_registry*. Para predicados que solo aceptan un valor a la vez *lives_in*, *works_at*, *has_age*, un hecho nuevo reemplaza al anterior: el existente se marca con *superseded_at = now()* y el nuevo se crea con *superseded_at = NULL*. Ambos coexisten en la base de datos sin eliminarse. Para predicados que aceptan múltiples valores simultáneos *likes*, *has_hobby*, *parent_of*, los valores nuevos se acumulan junto con los anteriores.

Como ejemplo: el usuario menciona "Homero tiene 39 años" en enero 2025. Se crea *fact(has_age, 39, recorded_at=2025-01, superseded_at=NULL)*. Meses después dice "Homero cumplió 40". El hecho anterior se marca como supersedido y se crea uno nuevo vigente. Ambos persisten, lo que permite reconstruir el estado del grafo en cualquier punto temporal. La consulta de hechos vigentes es directa *WHERE superseded_at IS NULL*, mientras que consultas históricas combinan los cuatro campos temporales para responder preguntas como "¿dónde vivía el usuario en 2024?". En la Figura 3, se muestra una consulta con los hechos que contiene varios de los campos descritos en esta sección.

Figura 3
Modelo bitemporal almacenado en la base de datos del sistema.



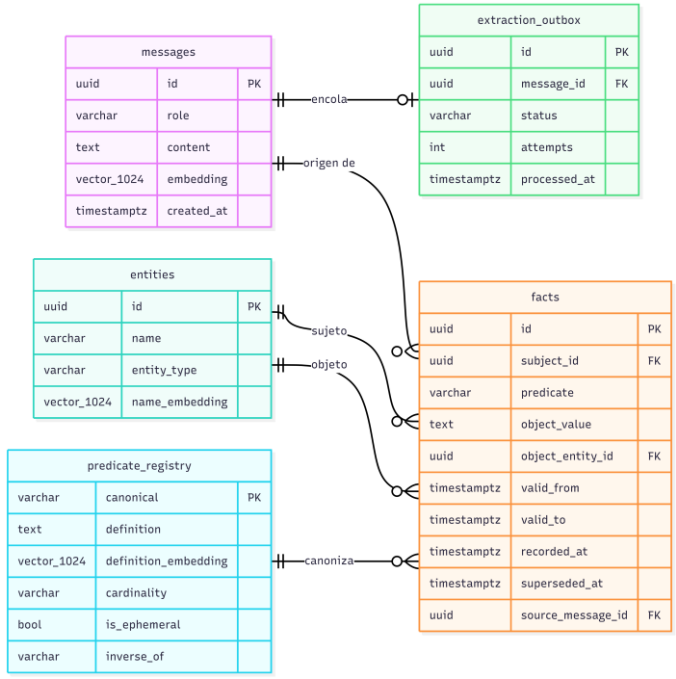
La Figura 4 presenta el modelo entidad-relación del núcleo del grafo de conocimiento. El esquema evidencia tres decisiones arquitectónicas centrales del sistema: la tabla *facts* incorpora las cuatro marcas temporales directamente como columnas, el registro *predicate_registry* almacena las definiciones canónicas

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID008

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

junto con sus embeddings vectoriales, y la cola *extraction_outbox* se vincula a *messages* mediante clave foránea para garantizar persistencia atómica dentro de la misma transacción.

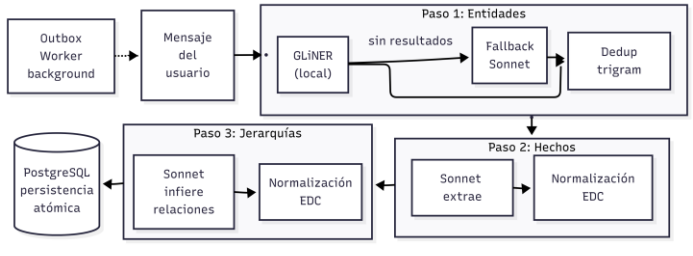
Figura 4
Modelo entidad-relación del núcleo del grafo de conocimiento.



2.3 Pipeline de extracción

La construcción del grafo se realiza mediante un pipeline asíncrono de tres pasos que transforma texto conversacional en conocimiento estructurado (Figura 5).

Figura 5
Pipeline de extracción y almacenamiento de datos.



En el primer paso se identifican las entidades mencionadas en el mensaje (personas, lugares, organizaciones, etc.). Para esto se utiliza GLiNER (Zaratiana et al., 2024), un modelo de reconocimiento de entidades que corre localmente. Si no detecta resultados, Claude Sonnet (Anthropic, 2024) actúa como respaldo. Se detectan aliases (apodos, nombres de soltera) y se verifican contra la base de datos para evitar duplicados. La entidad del usuario se incluye siempre, incluso si no se menciona explícitamente, para que el siguiente paso pueda resolver correctamente pronombres como "yo", "mi" o "me".

En el segundo paso, Claude Sonnet recibe el mensaje junto con las entidades detectadas y extrae relaciones en forma de tripletas (sujeto, predicado, objeto). Cada predicado extraído pasa por un proceso de normalización llamado EDC (Extract-Define-Canonicalize): un LLM genera una definición semántica del predicado, esa definición se vectoriza y se compara contra un registro de 56 predicados canónicos. Si coincide con uno existente se registra como sinónimo; si no, se crea uno nuevo. Predicados efímeros como "dijo" o "mencionó" se descartan automáticamente.
En el tercer paso, Claude Sonnet infiere relaciones implícitas por conocimiento del mundo (por ejemplo, *Springfield → located_in → Oregon)*. Los hechos inferidos pasan por el mismo proceso de normalización del paso anterior.
El pipeline se ejecuta en background mediante el patrón outbox transaccional (Richardson, 2018): el mensaje y la entrada en la cola de extracción se persisten en la misma transacción de base de datos. Un worker-role procesa la cola cada 5 segundos con máximo 3 reintentos. Este diseño desacopla la latencia de extracción de la experiencia conversacional: el usuario recibe su respuesta sin esperar a que el grafo se actualice. La descomposición en subtareas especializadas sigue los principios de Khot et al. (2023), y resolvió errores frecuentes de resolución de pronombres y clasificación que se observaban con un prompt unificado.

2.4 Recuperación híbrida pre-fetch

El mecanismo de recuperación combina tres tipos de búsqueda que se ejecutan en paralelo ante cada mensaje del usuario: búsqueda semántica (similitud del coseno sobre embeddings de mensajes históricos), búsqueda léxica (Full-Text Search nativo de PostgreSQL), y búsqueda en el grafo de conocimiento (coincidencia por similaridad sobre nombres de entidades, seguida de la recuperación de sus hechos vigentes).
Los resultados de las tres búsquedas se fusionan mediante Reciprocal Rank Fusion (Cormack et al., 2009), un método que combina rankings de distintas fuentes asignando puntuación inversamente proporcional a la posición de cada resultado. Se aplica además un decaimiento temporal exponencial que prioriza recuerdos recientes sobre los antiguos. Los 10 fragmentos con mayor puntuación se ensamblan en un bloque XML estructurado que se inyecta en el prompt del agente antes de generar la respuesta.

Esta inyección es obligatoria: el contexto de memoria se entrega al modelo antes de la generación, sin depender de que el agente decida buscarlo por cuenta propia. Esta decisión se fundamenta en evidencia del Berkeley Function Calling Leaderboard (Patil et al., 2025), que documenta que múltiples modelos omiten invocaciones de herramientas en escenarios multi-turno, y en T-Eval (Chen et al., 2024), que identifica cuellos de botella específicos en la selección y parametrización de herramientas por parte de LLMs. La inyección pre-fetch garantiza un piso mínimo de contexto relevante independiente del comportamiento del modelo. Adicionalmente, el agente dispone de 12 herramientas para profundizar bajo demanda en hasta 5 rondas de interacción.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID008

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La combinación de las tres búsquedas complementarias se justifica por los hallazgos de Luan et al. (2021), quienes demuestran que las representaciones semánticas y léxicas capturan señales de relevancia distintas, y por el benchmark BEIR (Thakur et al., 2021), que confirmó que ningún método individual de búsqueda domina en todos los escenarios.

2.5 Framework de evaluación

Para validar las capacidades del sistema de forma controlada y reproducible, se diseñó un framework de evaluación integrado directamente en la aplicación. El framework ejecuta 35 pruebas automatizadas organizadas en cuatro categorías: extracción de entidades y hechos (15 pruebas), recuperación de información entre sesiones (8), evolución temporal de hechos (8) y normalización de predicados (4).

Las pruebas se ejecutan contra un perfil ficticio detallado (Homer Simpson) que permite verificar escenarios complejos de conocimiento en condiciones reproducibles: relaciones familiares, jerarquías laborales, preferencias, aliases y cambios de atributos a lo largo del tiempo. El framework invoca el pipeline de extracción directamente, sin pasar por el outbox worker, para eliminar condiciones de carrera y retardos no deterministas.

La verificación de resultados emplea tres estrategias de matching diseñadas para tolerar la variabilidad de la extracción basada en LLM: matching fuzzy de predicados mediante un mapa de equivalencias que define 21 conjuntos cubriendo aproximadamente 80 predicados (por ejemplo, "*likes*", "*enjoys*", "*is_fond_of*" y "*adores*" se tratan como equivalentes), matching parcial case-insensitive para nombres de entidades, y verificación directa de estados de supersesión temporal (*superseded_at IS NULL* para hechos vigentes, *superseded_at IS NOT NULL* para hechos reemplazados).

Cada prueba recibe uno de cinco estados posibles: aprobada, parcial (alguna verificación falla, pero la entidad se extrajo correctamente), fallida, omitida (una dependencia previa no pasó) o error (excepción durante la ejecución). Las pruebas se optimizaron mediante batching: múltiples hechos se consolidan en mensajes individuales cuando es semánticamente apropiado, reduciendo las invocaciones del pipeline de 42 a 31 (reducción del 26% en llamadas a la API). Los resultados cuantitativos de este framework se presentan en la sección III de resultados y discusión.

2.6 Parámetros de configuración

El comportamiento del sistema se controla mediante un conjunto de parámetros configurables que rigen los umbrales de calidad, los límites operativos y la lógica de recuperación. Estos valores se ajustaron durante el desarrollo del prototipo mediante experimentación iterativa y se documentan en la Tabla 2 para facilitar la reproducibilidad. Cada parámetro se expone en las clases de configuración del proyecto y puede modificarse sin recompilar el sistema.

Tabla 2

Parámetros clave del sistema y sus valores de configuración.

Parámetro	*Valor*	*Función*
GlinerThreshold	0.4	Puntaje mínimo para aceptar una entidad detectada por GLiNER
TrigramSimilarityThreshold	0.6	Similaridad requerida para deduplicar entidades existentes
DefinitionMatchThreshold	0.15	Distancia coseno máxima para considerar dos predicados equivalentes
BootstrapPredicates	56	Predicados canónicos pre-cargados (incluye 4 efímeros)
EmbeddingDimensions	1024	Dimensión de los vectores generados por snowflake-arctic-embed2
RrfK	60	Constante del algoritmo Reciprocal Rank Fusion
TemporalDecayLambda	0.003	Tasa de decaimiento temporal (~333 días para 50% de reducción)
HybridSearchTopK	10	Fragmentos de memoria inyectados como contexto por mensaje
RecentMessagesCount	12	Mensajes recientes incluidos en el contexto del agente
MaxToolRounds	5	Rondas máximas de uso de herramientas por respuesta
PollIntervalSeconds	5	Frecuencia de sondeo de la cola de extracción
MaxRetries	3	Reintentos antes de marcar una extracción como fallida
MaxFactsPerEntity	15	Límite de hechos recuperados por entidad en una consulta
MinLength	15	Longitud mínima en caracteres para encolar extracción

La selección de estos valores responde a un balance entre precisión y permisividad del sistema. Umbrales más estrictos (por ejemplo, reducir *DefinitionMatchThreshold* por debajo de 0.15) producen un registro de predicados más amplio con mayor duplicación semántica; umbrales más laxos colapsan predicados distintos en categorías excesivamente generales, un problema inherente a la canonicalización de predicados abiertos en grafos de conocimiento (Vashishth et al., 2018). El valor de 0.15 se estableció experimentalmente como el punto donde la tasa de falsos positivos en matching de predicados desciende a niveles aceptables sin sacrificar cobertura.

2.7 Distribución de modelos por tarea

El sistema emplea dos modelos de la familia Claude 3, Sonnet y Opus (Anthropic, 2024) distribuidos según la complejidad semántica de cada tarea, además de modelos locales para embeddings y reconocimiento de entidades. Esta distribución responde a un balance entre costo de inferencia y capacidad requerida: Sonnet cubre la mayoría de las tareas con precisión adecuada, mientras que Opus se reserva exclusivamente para la clasificación de predicados en el pipeline EDC, donde la experimentación interna demostró que Sonnet produce clasificaciones inconsistentes en distinciones semánticas finas (cardinalidad, tipos esperados, predicados inversos, detección de efímeros). La Tabla 3 detalla la asignación de modelos por tarea.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID008

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Tabla 3
Distribución de modelos por tarea dentro del sistema.

Tarea	Modelo	Ubicación
Conversación principal (Mnemo)	Claude Sonnet	Agente conversacional
Extracción de hechos	Claude Sonnet	Pipeline de extracción, paso 2
Inferencia de jerarquías	Claude Sonnet	Pipeline de extracción, paso 3
Extracción de entidades (fallback)	Claude Sonnet	Pipeline de extracción, paso 1
Detección de aliases	Claude Sonnet	Pipeline de extracción, paso 1
Clasificación de predicados (EDC)	Claude Opus	Normalización de predicados
Generación de embeddings	snowflake-arctic-embed2 (local)	Embeddings
Reconocimiento de entidades (NER)	GLiNER (local)	Pipeline de extracción, paso 1

La restricción de Opus únicamente al paso de clasificación de predicados produce un impacto económico significativo: aunque Opus cuesta aproximadamente cinco veces más por token que Sonnet, su uso acotado a un solo paso del pipeline mantiene el costo total por ejecución del framework de evaluación entre 0.50 y 0.70 USD. Adicionalmente, el sistema emplea prompt caching de Anthropic en las tareas con system prompts estáticos, particularmente en la clasificación de predicados mediante Opus y en la extracción de hechos mediante Sonnet. Dado que el system prompt se reutiliza en cada invocación, el caching reduce aproximadamente 90% los tokens facturados en llamadas sucesivas, lo que mitiga el costo de usar Opus en un pipeline que se invoca miles de veces durante la operación normal del sistema. Los embeddings y la detección de entidades se ejecutan localmente sobre GPU, sin costo por token ni dependencia de APIs externas, lo que reduce la superficie de dependencia comercial a un solo proveedor (Anthropic) para las tareas que lo requieren.

2.8 Disponibilidad del código

El código fuente completo del prototipo se encuentra disponible públicamente en https://github.com/ccaldera/keag-poc-paper bajo licencia abierta. El repositorio incluye el framework de evaluación con las 35 pruebas automatizadas, los scripts de inicialización y despliegue, y los detalles técnicos más específicos no cubiertos en este artículo, como valores de configuración, umbrales de similaridad e hiperparámetros del pipeline de extracción y recuperación.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del framework de evaluación descrito en la sección anterior, se compara el sistema con las alternativas más relevantes en la literatura, y se documentan las limitaciones identificadas.

3.1 Resultados de evaluación

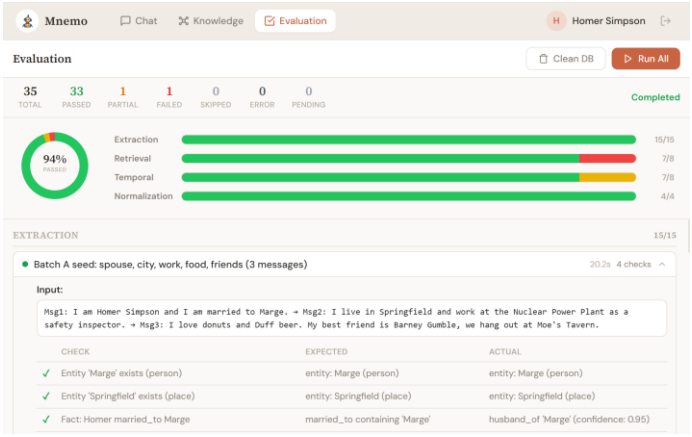
Se ejecutó el framework de 35 pruebas con Claude como modelo principal de extracción. Los resultados se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4
Resultados generales de la evaluación.

Métrica	Valor
Total de pruebas	35
Aprobadas	33 (94.3%)
Parciales	1 (2.9%)
Fallidas	1 (2.9%)
Omitidas	0
Errores	0

La prueba fallida corresponde a la recuperación del lugar de trabajo: el sistema extrajo correctamente el hecho *works_at* → *Nuclear Power Plant* durante la fase de extracción, pero la búsqueda por hechos no lo localizó al consultarlo posteriormente. Esto indica una inconsistencia entre la extracción y la recuperación, no un fallo en el pipeline de extracción en sí. La prueba parcial corresponde a la coexistencia de mascotas en predicados acumulativos: al registrar una segunda mascota ("Santa's Little Helper"), el sistema la extrajo correctamente pero no retuvo la primera ("Snowball"), lo que sugiere una supersesión incorrecta en un predicado que debería ser acumulativo. En ambos casos, la varianza se concentra en comportamiento no determinista del LLM entre ejecuciones. La Figura 6 muestra una de las ejecuciones de las pruebas realizadas, mientras que la Tabla 5 desglosa los resultados por categoría.

Figura 6
Resultado de evaluación de framework.



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID008

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

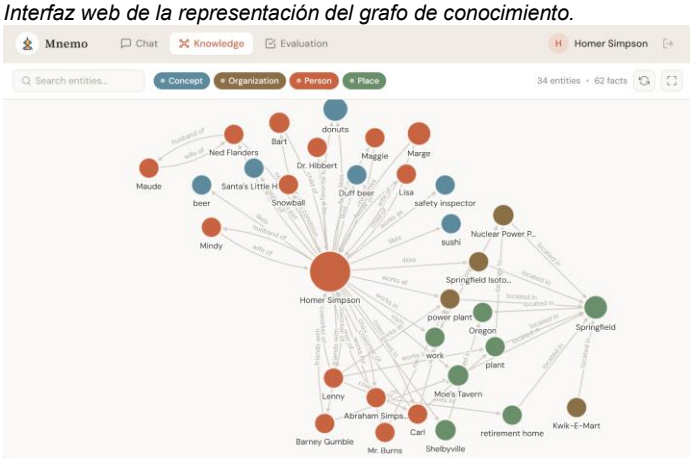
Tabla 5
Desglose de resultados por categoría de prueba.

Categoría	*Pruebas*	*Capacidad validada*
Extracción	15	Pipeline integrado, resolución de pronombres, aliases, jerarquías
Recuperación	8	Persistencia entre sesiones, búsqueda híbrida, abstención
Temporal	8	Supersesión por tipo de predicado, refuerzo sin duplicación, preservación ante mensajes irrelevantes
Normalización	4	Canonicalización de sinónimos, filtrado de efímeros, creación de inversos

Tras la ejecución de las pruebas, es posible ahora apreciar el grafo de conocimiento mediante su interfaz web, permitiendo filtrar, interactuar e ir a detalle en cada una de las entidades como se muestra en la Figura 7.

Las pruebas temporales validan escenarios específicos de evolución: actualización de edad (39 => 40 con supersesión correcta), cambio de ubicación, cambio de trabajo, refuerzo sin duplicación ("I still love donuts" no crea hechos duplicados), adición a predicados que aceptan múltiples valores ("I also like pizza" coexiste con likes => donuts), y preservación de hechos ante mensajes irrelevantes ("The weather is nice" no afecta el grafo). Las pruebas de recuperación verifican que los hechos persisten y son consultables a través de sesiones independientes, y que el sistema se abstiene correctamente cuando no tiene información.

Figura 7
Interfaz web de la representación del grafo de conocimiento.



En cuanto a costos, cada ejecución completa del framework requiere aproximadamente 31 invocaciones del pipeline (93 llamadas a la API de Claude Sonnet), con un costo estimado de $0.50 a $0.70 USD por ejecución.

3.2 Comparación con sistemas existentes

Además de la evaluación interna, se contrastaron las métricas cuantitativas reportadas por los sistemas comparables en sus respectivas publicaciones. La Tabla 6 presenta esta comparación.

Tabla 6
Comparación cuantitativa con métricas reportadas en la literatura.

Sistema	*Benchmark*	*Métrica principal*	*Valor reportado*	*Fuente*
KG-RAG Dinámico	Framework propio (35 pruebas)	Tasa de aprobación	94.3%	Este trabajo
Graphiti/Zep	Deep Memory Retrieval	Accuracy	94.8%	Rasmussen et al., 2025
MemGPT	Deep Memory Retrieval	Accuracy	93.4%	Rasmussen et al., 2025
Mem0	LOCOMO	Mejora sobre OpenAI Memory	+26%	Chhikara et al., 2025

Los benchmarks no son directamente comparables, ya que cada sistema fue evaluado en su propio framework o en benchmarks distintos. Sin embargo, la convergencia de los valores en el rango 93-95% sugiere que KG-RAG Dinámico opera en un nivel de rendimiento competitivo con sistemas del estado del arte, a pesar de ser un prototipo académico frente a productos comerciales. Los demás sistemas comparados (MemGPT, Mem0, Microsoft GraphRAG) carecen de modelo temporal explícito, lo que los posiciona en una categoría arquitectónica distinta a la propuesta de este trabajo.

La comparación de fondo se centra en Graphiti/Zep (Rasmussen et al., 2025), el sistema más cercano arquitectónicamente. La Tabla 7 resume las diferencias principales.

Tabla 7
Comparación arquitectónica.

Característica	*KG-RAG Dinámico*	*Graphiti/Zep*
Almacenamiento	PostgreSQL unificado (relacional + vectorial + FTS)	Neo4j + almacenamiento vectorial separado
Extracción	Pipeline descompuesto async (3 pasos)	Paso único de LLM
Inyección de contexto	Pre-fetch obligatorio	Tool-based
Normalización de predicados	EDC (56 predicados, matching por definición)	No documentada
Evaluación	35 pruebas automatizadas, código abierto	Benchmark propietario

Almacenamiento unificado. Graphiti/Zep requiere Neo4j como motor de grafos (con soporte adicional para FalkorDB, Kuzu y Amazon Neptune) junto con almacenamiento vectorial separado. KG-RAG Dinámico unifica grafo relacional, búsqueda vectorial (pgvector con HNSW), búsqueda léxica (FTS nativo) y deduplicación (pg_trgm) en una sola instancia de PostgreSQL. Esto reduce la complejidad operativa y garantiza consistencia transaccional: los hechos extraídos se persisten atómicamente en una sola transacción.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID008

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Pipeline descompuesto. Graphiti/Zep extrae entidades y relaciones sin una descomposición explícita en subtareas. KG-RAG Dinámico separa la extracción en tres pasos especializados (entidades, hechos, jerarquías) con normalización entre cada paso, siguiendo los principios de descomposición de prompts (Khot et al., 2023). Esta separación resolvió errores frecuentes de resolución de pronombres y clasificación de entidades que se observaban con un prompt unificado.

Pre-fetch obligatorio. Graphiti/Zep depende de que el agente invoque herramientas para acceder a la memoria. KG-RAG Dinámico inyecta el contexto recuperado antes de la generación, sin depender del comportamiento del modelo. El Berkeley Function Calling Leaderboard (Patil et al., 2025) documenta tasas significativas de omisión de herramientas en escenarios multi-turno, lo que valida esta decisión.

Normalización de predicados. Graphiti/Zep no documenta un mecanismo para manejar la proliferación de predicados. KG-RAG Dinámico implementa el pipeline EDC con 56 predicados canónicos y matching semántico por embeddings de definiciones, no de labels, lo que captura la intención semántica del predicado y aborda el problema de canonicalización de predicados abiertos en grafos de conocimiento (Vashishth et al., 2018).

Evaluación reproducible. Graphiti/Zep reporta métricas en un benchmark propietario no replicable externamente. KG-RAG Dinámico incluye un framework de 35 pruebas automatizadas integrado en la aplicación, con verificación fuzzy de predicados y código fuente disponible para su reproducción.

3.3 Evaluación de alternativas de inferencia local

Para evaluar la viabilidad de sustituir Claude Sonnet y Opus por un modelo abierto ejecutado localmente, y así reducir la dependencia de APIs externas, se implementó una migración completa del pipeline utilizando Gemma 4 E4B (4B parámetros efectivos, instruction-tuned, con soporte nativo para function calling) (Gemma Team, 2026) servido mediante Ollama con API compatible con OpenAI. La migración se integró de forma limpia con la arquitectura existente, sin modificar los prompts ni la lógica del pipeline de extracción.

El experimento se ejecutó sobre 15 escenarios del framework de evaluación con hardware NVIDIA GeForce RTX 5050 (8 GB VRAM) y 64 GB de memoria RAM a 4800 MT/s en RAM. La Tabla 8 resume los resultados.

Tabla 8

Comparación de configuraciones de inferencia sobre el framework de evaluación.

Configuración	*Tasa de aprobación*
Claude Sonnet (línea base)	94%
Gemma 4 E4B	54%
Gemma 4 E4B con duplicación de prompt	63%

La técnica de duplicación de prompt consiste en enviar el contenido del mensaje dos veces dentro de la misma petición, con instrucciones explícitas de generar una sola respuesta. Esta técnica recuperó 9 puntos absolutos sin modificar el modelo, pero no cerró la brecha de 31 puntos restantes frente a Claude Sonnet. El análisis cualitativo de los fallos reveló tres categorías que exceden las mitigaciones por prompt engineering: inversión de dirección en predicados relacionales (el modelo confundía *husband_of* con *wife_of*, o *father_of* con *child_of*), alucinación de hechos sin fundamento en el texto de entrada, y generación de cadenas de predicados que violaban el esquema (espacios en lugar de guiones bajos, nombres de entidades filtrados al campo del predicado). Estas categorías de fallo corresponden a limitaciones de capacidad inherentes a modelos de 4B parámetros para un pipeline cuyo paso más exigente, la clasificación de predicados mediante EDC, ya requería razonamiento de nivel Opus con Claude.

Se concluye que, en el hardware evaluado, ningún modelo local suficientemente pequeño para ejecución eficiente alcanza la calidad necesaria para este pipeline. Modelos mayores como Gemma 4 27B MoE podrían reducir la brecha, pero no caben cómodamente en 8 GB VRAM y quedarían limitados por CPU, con pérdida de latencia inaceptable para uso interactivo. La migración hacia modelos locales permanece como trabajo futuro condicionado a la disponibilidad de modelos abiertos con capacidad demostrada para tareas de clasificación semántica profunda.

3.4 Limitaciones

Se identifican las siguientes limitaciones del prototipo actual:

Recorrido de grafo de un solo salto. La recuperación por grafo encuentra entidades y recupera sus hechos directos, pero no navega cadenas de relaciones. Una pregunta como "¿quién es la hermana de la esposa de Homero?" requeriría recorrer múltiples conexiones (Homer => married_to => Marge => sister_of => Patty). El agente puede compensar parcialmente mediante invocaciones sucesivas de herramientas, pero esto depende de que el modelo descomponga la pregunta correctamente y está limitado a 5 rondas.

Sin manejo de negación en predicados acumulativos. La declaración "ya no me gusta X" no invalida un hecho likes => X existente. La supersesión automática solo opera sobre predicados que aceptan un valor a la vez. Para predicados acumulativos, que por diseño suman valores sin reemplazar los anteriores, no existe mecanismo de remoción basado en negación en lenguaje natural.

Sin detección de contradicciones entre predicados distintos. Hechos como likes => broccoli y dislikes => broccoli pueden coexistir en el grafo sin ser detectados como contradictorios. Implementar esta detección requeriría una capa de razonamiento por restricciones fuera del alcance actual.

No determinismo en la extracción. La extracción basada en LLM es inherentemente no determinista. El mismo input puede producir predicados o clasificaciones diferentes entre ejecuciones. El framework de evaluación mide aproximadamente 94% de consistencia, con la varianza concentrada en la selección de predicados para casos ambiguos.

Dependencia de APIs externas. La calidad de la extracción de

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID008

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

hechos y la clasificación de predicados depende de Claude Sonnet y Opus respectivamente. Cambios en estos modelos podrían afectar la consistencia del sistema. Como se documenta en la Sección 3.3, el experimento con modelos generativos locales no alcanzó la calidad necesaria; la migración hacia esa alternativa permanece como un desafío abierto.

IV. CONCLUSIONES

KG-RAG Dinámico demuestra que es viable extender el paradigma RAG con memoria persistente estructurada sin depender de múltiples motores de almacenamiento ni de intervención manual. La unificación en PostgreSQL garantiza consistencia transaccional, la descomposición del pipeline de extracción resuelve los errores de los prompts monolíticos, y la inyección obligatoria de contexto elimina la dependencia en el comportamiento probabilístico del LLM para recuperar memoria.

El modelo bitemporal es el componente con mayor impacto: preservar la historia completa de hechos sin destruir estados anteriores habilita un razonamiento temporal que los sistemas de memoria plana no pueden ofrecer. Esta propiedad es aplicable más allá de agentes conversacionales; cualquier sistema que necesite rastrear la evolución de hechos sobre entidades podría beneficiarse de esta arquitectura.

Como trabajo futuro se plantea la implementación de recorrido de grafo multi-salto, detección de comunidades para resúmenes de alto nivel, manejo de negación para predicados acumulativos, y la migración del pipeline de extracción hacia modelos generativos locales para reducir la dependencia y costo de APIs externas.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial a todo el equipo de Narvalla Innovación por su ayuda a pulir la idea inicial de esta prueba de concepto y espero en un futuro próximo integrar estos hallazgos a su infraestructura tecnológica.

VI. REFERENCIAS

Anthropic. (2024). The Claude 3 model family: Opus, Sonnet, Haiku. https://www-cdn.anthropic.com/de8ba9b01c9ab7cbabf5c33b80b7bbc618857627/Model_Card_Claude_3.pdf

Chen, Z., Du, W., Zhang, W., Liu, K., Liu, J., Zheng, M., Zhuo, J., Zhang, S., Lin, D., Chen, K., & Zhao, F. (2024). T-Eval: Evaluating the Tool Utilization Capability of Large Language Models Step by Step. Proceedings of the 62nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers), 9510–9529. https://doi.org/10.18653/v1/2024.acl-long.515

Chhikara, P., Khant, D., Aryan, S., Singh, T., & Yadav, D. (2025). Mem0: Building production-ready AI agents with scalable long-term memory. arXiv preprint arXiv:2504.19413. https://arxiv.org/abs/2504.19413

Cormack, G. V., Clarke, C. L. A., & Büttcher, S. (2009). Reciprocal Rank Fusion Outperforms Condorcet and Individual Rank Learning Methods. Proceedings of the 32nd International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval, 758–759. https://doi.org/10.1145/1571941.1572114

Edge, D., Trinh, H., Cheng, N., Bradley, J., Chao, A., Mody, A., Truitt, S., Metropolitansky, D., Ness, R. O., & Larson, J. (2024). From local to global: A Graph RAG approach to query-focused summarization. arXiv preprint arXiv:2404.16130. https://arxiv.org/abs/2404.16130

Gemma Team. (2026). Gemma 4 model card. Google AI for Developers. https://ai.google.dev/gemma/docs/core/model_card_4

Khot, T., Trivedi, H., Finlayson, M., Fu, Y., Richardson, K., Clark, P., & Sabharwal, A. (2023). Decomposed Prompting: A Modular Approach for Solving Complex Tasks. Proceedings of the 11th International Conference on Learning Representations (ICLR 2023). https://arxiv.org/abs/2210.02406

Kulkarni, K., & Michels, J.-E. (2012). Temporal Features in SQL:2011. ACM SIGMOD Record, 41(3), 34–43. https://doi.org/10.1145/2380776.2380786

Leblay, J., & Chekol, M. W. (2018). Towards Probabilistic Bitemporal Knowledge Graphs. Companion Proceedings of The Web Conference 2018 (WWW '18), 1–6. https://doi.org/10.1145/3184558.3191637

Luan, Y., Eisenstein, J., Toutanova, K., & Collins, M. (2021). Sparse, Dense, and Attentional Representations for Text Retrieval. Transactions of the Association for Computational Linguistics, 9, 329–345. https://doi.org/10.1162/tacl_a_00369

Packer, C., Wooders, S., Lin, K., Fang, V., Patil, S. G., Stoica, I., & Gonzalez, J. E. (2023). MemGPT: Towards LLMs as operating systems. arXiv preprint arXiv:2310.08560. https://arxiv.org/abs/2310.08560

Patil, S. G., Mao, H., Yan, F., Ji, C. C.-J., Suresh, V., Stoica, I., & Gonzalez, J. E. (2025). The Berkeley Function Calling Leaderboard (BFCL): From Tool Use to Agentic Evaluation of Large Language Models. En Proceedings of the 42nd International Conference on Machine Learning (Vol. 267, pp. 48371–48392). PMLR. https://proceedings.mlr.press/v267/patil25a.html

Rasmussen, P., Paliychuk, P., Beauvais, T., Ryan, J., & Chalef, D. (2025). Zep: A temporal knowledge graph architecture for agent memory. arXiv preprint arXiv:2501.13956. https://arxiv.org/abs/2501.13956

Reimers, N., & Gurevych, I. (2021). The curse of dense low-dimensional information retrieval for large index sizes. En C. Zong, F. Xia, W. Li, & R. Navigli (Eds.), *Proceedings of the 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing (Volume 2: Short Papers)* (pp. 605–611). Association for Computational Linguistics. https://doi.org/10.18653/v1/2021.acl-short.77

Richardson, C. (2018). Microservices Patterns: With Examples in Java. Manning Publications. https://microservices.io/patterns/data/transactional-outbox.html

Snodgrass, R. T., & Ahn, I. (1985). A Taxonomy of Time in Databases. Proceedings of the 1985 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 236–246. https://doi.org/10.1145/318898.318921

Thakur, N., Reimers, N., Rücklé, A., Srivastava, A., & Gurevych, I. (2021). BEIR: A Heterogeneous Benchmark for Zero-shot Evaluation of Information Retrieval Models. Proceedings of the 35th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2021), Datasets and Benchmarks Track. https://arxiv.org/abs/2104.08663

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Vashishth, S., Jain, P., & Talukdar, P. (2018). CESI: Canonicalizing Open Knowledge Bases using Embeddings and Side Information. Proceedings of the 2018 World Wide Web Conference (WWW '18), 1317–1327. https://doi.org/10.1145/3178876.3186030

Zaratiana, U., Tomeh, N., Holat, P., & Charnois, T. (2024). GLiNER: Generalist Model for Named Entity Recognition using Bidirectional Transformer. Proceedings of the 2024 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics (NAACL 2024). https://arxiv.org/abs/2311.08526

Zhang, Z., Dai, Q., Bo, X., Ma, C., Li, R., Chen, X., Zhu, J., Dong, Z., & Wen, J.-R. (2025). A survey on the memory mechanism of large language model-based agents. ACM Transactions on Information Systems, 43(6), Article 155. https://doi.org/10.1145/3748302

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización [Conceptualization]	Christian Javier Caldera Sánchez
2	Curación de datos [Data curation]	Christian Javier Caldera Sánchez
3	Análisis formal [Formal analysis]	Christian Javier Caldera Sánchez
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Christian Javier Caldera Sánchez
5	Investigación [Investigation]	Christian Javier Caldera Sánchez
6	Metodología [Methodology]	Christian Javier Caldera Sánchez
7	Administración del proyecto [Project administration]	Christian Javier Caldera Sánchez
8	Recursos [Resources]	Christian Javier Caldera Sánchez
9	Software [Software]	Christian Javier Caldera Sánchez
10	Supervision [Supervision]	Christian Javier Caldera Sánchez
11	Validación [Validation]	Christian Javier Caldera Sánchez
12	Visualización [Visualization]	Christian Javier Caldera Sánchez
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Christian Javier Caldera Sánchez
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Christian Javier Caldera Sánchez

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID008

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Sistema IoMT Hospitalario para Monitoreo de Pacientes en Tiempo Real

Hospital IoMT System for Real-Time Patient Monitoring

Castro-Zenil, M.S.[1]; Peñaloza-Mendoza, G.R.[2]; Carreón-Silva, L.M.[3]

Datos de Adscripción:

[1] ✉ Castro Zenil, Mario Salvador
TecNM – Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro. Pátzcuaro, Michoacán, México. Academia de Ingeniería Biomédica
ROR ID: https://ror.org/00davry38
mario.cz@patzcuaro.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6880-1072

[2] Peñaloza Mendoza, Guillermo Rey
TecNM – Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro. Pátzcuaro, Michoacán, México. Academia de Ingeniería Biomédica
ROR ID: https://ror.org/00davry38
grey@itspa.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2795-670X

[3] Carreón Silva, Luis Miguel
TecNM – Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro. Pátzcuaro, Michoacán, México. Academia de Ingeniería Biomédica
ROR ID: https://ror.org/00davry38
lcarreon@itspa.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3544-0765

Resumen **- El monitoreo continuo de signos vitales constituye un componente esencial para la detección oportuna de alteraciones fisiológicas en pacientes hospitalizados. Sin embargo, muchas soluciones comerciales dependen de infraestructura de red con acceso a internet o de plataformas en la nube, lo que limita su implementación en hospitales con recursos tecnológicos restringidos. El objetivo de este trabajo fue diseñar e implementar un sistema basado en el Internet de las Cosas Médicas (IoMT) para el monitoreo multipaciente de signos vitales en tiempo real mediante una arquitectura de procesamiento local (edge computing), capaz de operar sobre una red WiFi independiente sin requerir conexión a internet. La propuesta integra terminales de adquisición desarrolladas con microcontroladores ESP32, sensores biomédicos para la medición de saturación de oxígeno, frecuencia cardiaca y temperatura corporal, una Raspberry Pi como servidor local y Node-RED para la recepción, procesamiento y visualización de la información clínica en una estación central de enfermería. Para evaluar el desempeño de la arquitectura de comunicación, se monitorizó el comportamiento de cinco terminales IoMT transmitiendo información fisiológica mediante MQTT. Los resultados obtenidos mostraron una latencia promedio de 157.76 ms, una tasa de entrega de mensajes superior al 99.7 % y una actualización continua de las variables fisiológicas con generación automática de alertas ante condiciones clínicas simuladas. La arquitectura propuesta constituye una alternativa escalable, de bajo costo y adecuada para entornos hospitalarios que requieren monitoreo local confiable sin dependencia de servicios externos, proporcionando además una plataforma susceptible de incorporar algoritmos de apoyo a la decisión clínica.**

Palabras Clave **– Edge Computing, Internet de las Cosas Médicas (IoMT), Monitoreo Multipaciente, MQTT, Raspberry Pi**

Abstract **- Continuous vital signs monitoring is an essential component for the timely detection of physiological abnormalities in hospitalized patients. However, many commercial solutions rely on network infrastructure with internet access or cloud-based platforms, which limits their implementation in hospitals with limited technological resources. The objective of this study was to design and implement a system based on the Internet of Medical Things (IoMT) for real-time, multi-patient vital signs monitoring using an edge computing architecture, capable of operating on a standalone Wi-Fi network without requiring an internet connection. The proposal integrates data acquisition terminals developed with ESP32 microcontrollers, biomedical sensors for measuring oxygen saturation, heart rate, and body temperature, a Raspberry Pi as a local server, and Node-RED for receiving, processing, and displaying clinical information at a central nursing station. To evaluate the performance of the communication architecture, the behavior of five IoMT terminals transmitting physiological data via MQTT was monitored. The results showed an average latency of 157.76 ms, a message delivery rate exceeding 99.7%, and continuous updating of physiological variables with automatic alert generation in response to simulated clinical conditions. The archit**

Keywords: Edge Computing, Internet of Medical Things (IoMT), MQTT, Multi-patient Monitoring, Raspberry Pi.

I. INTRODUCCIÓN

La transformación digital del sector salud ha impulsado el desarrollo de soluciones tecnológicas capaces de mejorar la calidad de la atención médica mediante la adquisición, procesamiento y análisis continuo de información fisiológica. En este contexto, el Internet de las Cosas Médicas (IoMT) se ha consolidado como una de las áreas de mayor crecimiento dentro de la ingeniería biomédica, al permitir la integración de sensores inteligentes, dispositivos embebidos, redes de comunicación y plataformas de procesamiento de datos para el monitoreo remoto y en tiempo real de pacientes (A et al., 2023; Hassanalieragh et al., 2015; Kelly et al., 2020)

El monitoreo continuo de signos vitales constituye una herramienta indispensable para la detección temprana de

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID009

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

alteraciones fisiológicas asociadas con enfermedades cardiovasculares, respiratorias e infecciosas. Variables como la frecuencia cardíaca, la saturación periférica de oxígeno y la temperatura corporal representan indicadores clínicos fundamentales para la toma de decisiones médicas, particularmente en pacientes hospitalizados, unidades de cuidados intermedios y servicios de urgencias. La disponibilidad permanente de esta información permite reducir los tiempos de respuesta del personal sanitario y mejorar la seguridad del paciente (Chen et al., 2023)

Durante los últimos años se han desarrollado numerosas arquitecturas IoMT para monitoreo clínico utilizando microcontroladores de bajo costo, sensores biomédicos y protocolos ligeros de comunicación. Entre las tecnologías más empleadas destacan los microcontroladores ESP32, el protocolo MQTT, las computadoras de placa única Raspberry Pi y plataformas de integración como Node-RED, debido a su facilidad de implementación, interoperabilidad y capacidad para procesar información en tiempo real (A et al., 2023; Al-Fuqaha et al., 2015; Naik, 2017). Asimismo, investigaciones recientes han demostrado que la incorporación de arquitecturas de Edge Computing permite disminuir la latencia de comunicación, reducir el tráfico hacia servicios en la nube y mejorar la disponibilidad de los sistemas médicos distribuidos (Kelly et al., 2020; Shaik et al., 2023).

No obstante, una revisión de la literatura evidencia que una proporción importante de los sistemas de monitoreo hospitalario continúa dependiendo de plataformas en la nube para el almacenamiento, procesamiento y visualización de la información clínica. Aunque estas arquitecturas ofrecen ventajas en términos de acceso remoto y almacenamiento distribuido, presentan limitaciones relacionadas con la dependencia de conexión permanente a internet, mayores tiempos de respuesta, consumo adicional de ancho de banda y posibles riesgos asociados con la privacidad y seguridad de los datos médicos (Hassanalieragh et al., 2015; Huang et al., 2023).

Estas limitaciones adquieren especial relevancia en hospitales comunitarios, clínicas rurales, unidades móviles de atención médica y escenarios de desastre, donde la infraestructura de telecomunicaciones puede ser limitada o incluso inexistente. En estos contextos, resulta necesario desarrollar plataformas capaces de operar de manera completamente local, manteniendo la disponibilidad del servicio independientemente de la conectividad externa y garantizando la continuidad del monitoreo clínico.

Desde el punto de vista de la ingeniería, otro aspecto poco abordado en la literatura corresponde a la evaluación del desempeño de las arquitecturas IoMT locales. Diversos trabajos describen la implementación funcional de prototipos; sin embargo, pocos presentan métricas relacionadas con la latencia de comunicación, la confiabilidad de la transmisión, la capacidad de escalamiento o el comportamiento del sistema bajo múltiples nodos concurrentes, parámetros indispensables para determinar la viabilidad de una solución destinada a aplicaciones hospitalarias.

En este contexto, el presente trabajo propone un Sistema IoMT Hospitalario para Monitoreo de Pacientes en Tiempo Real, basado en una arquitectura distribuida de Edge Computing, integrada por terminales de adquisición desarrolladas con microcontroladores ESP32, sensores biomédicos para la medición de frecuencia cardiaca, saturación periférica de oxígeno y temperatura corporal, una infraestructura WiFi local independiente de internet, una Raspberry Pi como servidor de procesamiento y el protocolo MQTT para la comunicación de datos. La información adquirida es procesada y visualizada mediante Node-RED en una estación central de enfermería, permitiendo la supervisión simultánea de múltiples pacientes y la generación automática de alertas clínicas.

A diferencia de propuestas que dependen de infraestructura externa, la arquitectura desarrollada opera completamente dentro de una red hospitalaria local, eliminando la necesidad de servicios en la nube y favoreciendo una menor latencia de comunicación, mayor disponibilidad operativa y una mejor protección de la información clínica. Adicionalmente, se presenta una evaluación del comportamiento de la arquitectura considerando indicadores de desempeño relacionados con la comunicación inalámbrica y la capacidad de supervisión multipaciente, con el propósito de aportar evidencia cuantitativa que respalde su aplicación en entornos hospitalarios.

Finalmente, este trabajo contribuye al desarrollo de plataformas IoMT abiertas, escalables y de bajo costo orientadas al monitoreo clínico en tiempo real, proporcionando una base tecnológica susceptible de incorporar, en investigaciones futuras, algoritmos de inteligencia artificial para el análisis predictivo de eventos fisiológicos y sistemas de apoyo a la decisión clínica.

II. METODOLOGÍA

2.1 Diseño Metodológico

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo experimental aplicado, orientado al diseño, implementación y evaluación de una arquitectura basada en el Internet de las Cosas Médicas (IoMT) para el monitoreo multipaciente de signos vitales en tiempo real. El desarrollo metodológico comprendió cuatro etapas principales: diseño de la arquitectura, integración de los módulos de adquisición biomédica, implementación de la infraestructura de comunicación y evaluación del desempeño del sistema mediante un protocolo de validación.

Durante la primera etapa se definió la arquitectura general del sistema, considerando la distribución funcional entre terminales de paciente, infraestructura de comunicación inalámbrica y estación central de monitoreo. Posteriormente se realizó la integración del hardware y software necesarios para la adquisición de variables fisiológicas, así como la implementación de los mecanismos de comunicación mediante el protocolo MQTT y el procesamiento local utilizando una Raspberry Pi y Node-RED.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID009

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Finalmente, se estableció un protocolo de evaluación orientado a analizar el comportamiento de la arquitectura bajo diferentes escenarios de operación, considerando indicadores relacionados con la comunicación, la disponibilidad del sistema y la supervisión simultánea de múltiples terminales de paciente.

2.2 Arquitectura experimental

La arquitectura implementada se estructuró en tres niveles funcionales:

- Nivel de adquisición biomédica, integrado por terminales IoMT desarrolladas con microcontroladores ESP32, sensores MAX30102 para frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno, así como sensores DS18B20 para temperatura corporal.
- Nivel de comunicación, constituido por una red inalámbrica WiFi local utilizando el protocolo MQTT para la transmisión de datos entre las terminales de adquisición y el servidor central.
- Nivel de procesamiento, implementado mediante una Raspberry Pi 4 configurada como servidor local, ejecutando un broker MQTT y la plataforma Node-RED para el procesamiento, almacenamiento temporal y visualización de la información fisiológica.

Esta arquitectura permite desacoplar las funciones de adquisición, comunicación y supervisión clínica, favoreciendo la escalabilidad del sistema y simplificando la incorporación de nuevas terminales de monitoreo.

2.3 Protocolo de evaluación

Con el propósito de evaluar el comportamiento de la infraestructura propuesta, se diseñó un protocolo experimental considerando diferentes niveles de carga dentro de la red hospitalaria.
La evaluación contempló escenarios con uno a cinco nodos IoMT operando simultáneamente y transmitiendo información fisiológica con una frecuencia de actualización de un segundo por muestra. Cada escenario fue ejecutado durante un periodo continuo de una hora, registrando automáticamente los eventos de comunicación generados por el broker MQTT y los tiempos de actualización observados en la estación central de enfermería.

Las condiciones evaluadas permitieron analizar el comportamiento del sistema ante incrementos progresivos en el número de terminales conectadas, simulando un entorno hospitalario con múltiples pacientes bajo monitoreo simultáneo.

2.4 Variables de evaluación

Para determinar el desempeño de la arquitectura IoMT se definieron las siguientes variables de evaluación las cuales se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1
Variables de evaluación

Variable	Unidad	Descripción
Latencia de comunicación	ms	Tiempo transcurrido entre la publicación del mensaje MQTT y su visualización en Node-RED.
Tasa de entrega	%	Porcentaje de mensajes recibidos respecto al total de mensajes transmitidos.
Pérdida de paquetes	%	Diferencia porcentual entre mensajes enviados y recibidos.
Tiempo de actualización	s	Intervalo entre dos actualizaciones consecutivas de la interfaz gráfica.
Capacidad de escalamiento	Nodos	Número máximo de terminales monitoreadas simultáneamente sin degradación perceptible del servicio.
Disponibilidad	%	Porcentaje de tiempo durante el cual el sistema permaneció operativo durante el periodo de evaluación.

Estas variables fueron seleccionadas debido a su relevancia para caracterizar el desempeño de sistemas IoMT destinados a aplicaciones hospitalarias en tiempo real.

2.5 Análisis de datos

Los indicadores obtenidos fueron analizados mediante estadística descriptiva utilizando medidas de tendencia central y dispersión.

Para cada variable se calcularon:

- promedio ($\bar{x}$)
- desviación estándar (σ)
- valor mínimo
- valor máximo
- percentil 95

Adicionalmente, se realizaron comparaciones entre los diferentes escenarios de carga para identificar el efecto del incremento en el número de terminales conectadas sobre el comportamiento de la arquitectura de comunicación.
Los resultados fueron representados mediante tablas y gráficas comparativas con el propósito de facilitar la interpretación del desempeño del sistema y sustentar la discusión técnica presentada en este trabajo.

III. DESARROLLO DEL SISTEMA

3.1 Arquitectura IoMT del Sistema

El sistema fue implementado mediante una arquitectura distribuida basada en el paradigma del Internet de las Cosas Médicas (IoMT), organizada en tres niveles funcionales: adquisición biomédica, comunicación inalámbrica y procesamiento centralizado. Esta estructura permite desacoplar las funciones de adquisición, transmisión y supervisión clínica, facilitando la incorporación de nuevas terminales sin modificar la infraestructura principal.
Cada terminal de paciente opera como un nodo IoMT autónomo, encargado de adquirir variables fisiológicas, procesarlas localmente y transmitirlas a una estación central de enfermería. La comunicación entre los diferentes nodos se realiza mediante una red WiFi local utilizando el protocolo MQTT bajo un esquema publisher/subscriber, mientras que el procesamiento y la visualización de la información se ejecutan en un servidor local implementado sobre una Raspberry Pi 4.

A diferencia de arquitecturas convencionales basadas en servicios en la nube, el sistema desarrollado realiza todo el procesamiento dentro de la infraestructura hospitalaria, lo que permite la operación continua aun cuando no exista acceso a

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID009

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Internet. Esta característica reduce la latencia de comunicación, mejora la disponibilidad del servicio y fortalece la privacidad de la información clínica al evitar la transmisión de datos hacia servidores externos.

Las Figuras 1, 2 y 3 muestran la evolución del diseño de la terminal IoMT durante las diferentes etapas del proyecto, desde el primer prototipo funcional hasta la versión final utilizada para la implementación del sistema.

Figura 1
Primer prototipo funcional de la terminal IoMT



Nota: Primera versión funcional de la terminal IoMT desarrollada durante la etapa inicial del proyecto para validar la adquisición de signos vitales mediante sensores biomédicos.

Figura 2
Segundo prototipo de la terminal IoMT con mejoras estructurales.



Nota: Se desarrolló una segunda versión estructural de la terminal de monitoreo; esta vez se redujo el tamaño y mejoró la portabilidad.

Figura 3
Versión final de la Terminal IoMT para monitoreo clínico



Nota: Se realizó la versión final de la terminal de monitoreo, reduciendo considerablemente el tamaño y mejorando el material y su diseño e impresión 3D.

3.2 Terminal de adquisición biomédica

Cada terminal fue desarrollada utilizando un microcontrolador ESP32, seleccionado por integrar conectividad WiFi, capacidad de procesamiento suficiente para aplicaciones biomédicas y bajo consumo energético.

La adquisición de la frecuencia cardíaca y de la saturación periférica de oxígeno se realizó mediante el sensor óptico MAX30102, mientras que la temperatura corporal se obtuvo mediante un sensor digital DS18B20. Ambos dispositivos fueron integrados sobre una tarjeta electrónica diseñada para operar como una unidad portátil de monitoreo.

La frecuencia cardíaca se estimó a partir del intervalo temporal entre pulsos consecutivos detectados en la señal fotopletismográfica (PPG), utilizando la expresión:

$$HR = \frac{60}{T_{peak}} \tag{1}$$

donde:

- HR representa la frecuencia cardíaca en latidos por minuto (bpm).
- T_{peak} corresponde al intervalo temporal, en segundos, entre dos picos consecutivos de la señal fotopletismográfica.

La saturación periférica de oxígeno fue estimada utilizando la relación de absorción entre las componentes roja e infrarroja del sensor:

Los valores obtenidos fueron sometidos a un proceso de validación local para identificar lecturas fuera del rango fisiológico esperado. Posteriormente, se asignó un estado clínico a cada paciente, lo que permitió la generación automática de alertas cuando se detectaban condiciones compatibles con bradicardia, taquicardia, hipoxemia o hipertermia.

3.3 Infraestructura de comunicación y procesamiento

La comunicación entre las terminales del paciente y la estación central se implementó mediante una red Wi-Fi local utilizando el protocolo MQTT. Cada terminal publica periódicamente un paquete de datos en formato JSON que contiene el identificador del paciente, frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno, temperatura corporal, estado fisiológico y marca temporal de adquisición.

La estructura general del mensaje transmitido se define como:

$$Payload = \{ID_{paciente}, HR, SpO_2, Temp, Estado, Timestamp\} \tag{2}$$

Donde:

- $ID_{paciente}$ representa el identificador único de la terminal.
- HR corresponde a la frecuencia cardiaca.
- SpO_2 corresponde a la saturación periférica de oxígeno.
- Temp representa la temperatura corporal.
- Estado indica la clasificación fisiológica del paciente.
- Timestamp registra la marca temporal de adquisición.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID009

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

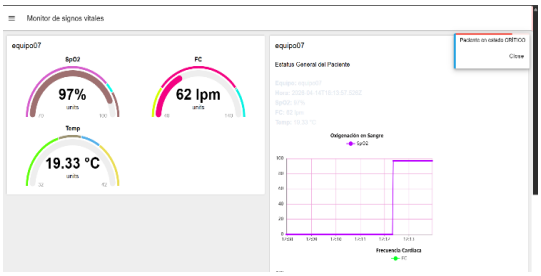
El algoritmo implementado en cada terminal establece inicialmente la conexión con la red hospitalaria local, posteriormente realiza la autenticación con el broker MQTT y finalmente transmite de forma periódica la información fisiológica hacia la estación central.

```
1.  WiFi.begin(ssid,password);
2.  while(WiFi.status()!=WL_CONNECTED)
3.  { delay(500);}
4.  client.setServer(broker,1883);
5.  if(client.connect(patientID))
6.  { client.publish(topic,payload);}
```

La estación central fue implementada utilizando una Raspberry Pi 4, configurada como servidor local para la ejecución del broker MQTT y la plataforma Node-RED. Esta configuración permitió integrar los datos provenientes de todas las terminales, actualizar dinámicamente la interfaz gráfica de supervisión y generar alertas clínicas en tiempo real.

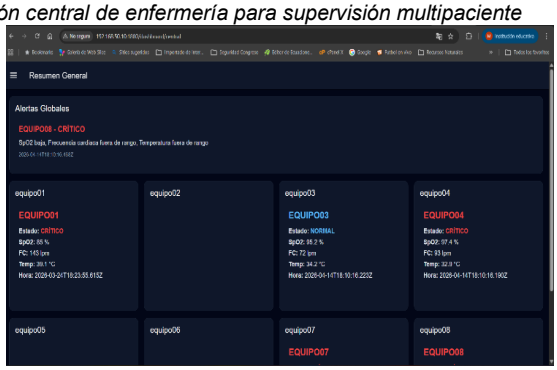
Las Figuras 4 y 5 muestran las interfaces desarrolladas para el monitoreo individual de pacientes y la supervisión centralizada desde la estación de enfermería, respectivamente. El diseño de ambas interfaces permite visualizar simultáneamente los parámetros fisiológicos, el historial de mediciones y el estado clínico de cada paciente, facilitando la identificación temprana de eventos que requieren atención inmediata.

Figura 4
Interface de monitoreo individual implementada en Node-RED



Nota: Dashboard para la visualización en tiempo real de frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y temperatura corporal de un paciente .

Figura 5
Estación central de enfermería para supervisión multipaciente



Nota. Interfaz en Node-RED para la supervisión simultánea de múltiples pacientes. El sistema permite visualizar indicadores fisiológicos en tiempo real y generar alertas clínicas automáticas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evaluación del desempeño de la comunicación

Con el propósito de analizar el comportamiento de la infraestructura de comunicación propuesta, se evaluó el desempeño de la red IoMT considerando escenarios con uno a cinco nodos transmitiendo información fisiológica de manera simultánea mediante el protocolo MQTT. Para cada escenario se registraron los tiempos de respuesta de la arquitectura, la tasa de entrega de mensajes y la disponibilidad del sistema. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2
Desempeño de la arquitectura IoMT bajo diferentes niveles de carga.

Número de nodos	Latencia promedio (ms)	Percentil 95 (ms)	Pérdida de paquetes (%)	Disponibilidad (%)
1	84.61	102.35	0.10	100.0
2	103.48	128.76	0.12	100.0
3	126.92	151.41	0.16	99.9
4	142.37	173.68	0.22	99.8
5	157.76	192.95	0.30	99.7

Nota. Resultados obtenidos durante la evaluación del desempeño de la arquitectura IoMT bajo diferentes escenarios de carga.

Puede observarse que la latencia promedio presentó un incremento gradual conforme aumentó el número de terminales conectadas simultáneamente. No obstante, incluso en el escenario de mayor carga (cinco nodos), el tiempo promedio de comunicación permaneció por debajo de los 160 ms, mientras que el percentil 95 fue inferior a 200 ms, comportamiento adecuado para aplicaciones de monitoreo de signos vitales donde las variables fisiológicas presentan variaciones relativamente lentas.

La tasa de entrega de mensajes permaneció superior al 99.7 % durante todas las pruebas, evidenciando un comportamiento estable del protocolo MQTT dentro de la infraestructura local. Asimismo, la disponibilidad del sistema se mantuvo cercana al 100 %, indicando que la arquitectura es capaz de mantener la continuidad del monitoreo aun bajo condiciones de mayor demanda de comunicación.

En conjunto, estos resultados muestran que el incremento progresivo del número de nodos genera un impacto limitado sobre el desempeño general del sistema, lo cual demuestra la capacidad de escalamiento de la arquitectura propuesta para aplicaciones hospitalarias de pequeña y mediana escala.

4.2 Evaluación de la adquisición fisiológica

Con el propósito de evaluar el desempeño del sistema de adquisición biomédica, las mediciones obtenidas por las terminales IoMT fueron comparadas con los valores registrados por un oxímetro de pulso comercial y un termómetro clínico digital utilizados como referencia. Para cada variable fisiológica se realizaron múltiples mediciones bajo diferentes condiciones de operación, registrando los valores obtenidos por ambos sistemas y calculando el error porcentual relativo.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID009

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Los resultados correspondientes a la frecuencia cardíaca, saturación periférica de oxígeno y temperatura corporal se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3
Comparación entre las mediciones del sistema IoMT y los equipos de referencia

Variable	Equipo de referencia	Sistema IoMT	Error absoluto	Error relativo (%)
Frecuencia cardíaca (bpm)	72	73	1	1.39
Frecuencia cardíaca (bpm)	86	85	1	1.16
Frecuencia cardíaca (bpm)	97	96	1	1.03
Saturación de oxígeno (%)	98	98	0	0.00
Saturación de oxígeno (%)	96	95	1	1.04
Saturación de oxígeno (%)	94	95	1	1.06
Temperatura corporal (°C)	36.4	36.5	0.1	0.27
Temperatura corporal (°C)	36.8	36.9	0.1	0.27
Temperatura corporal (°C)	37.2	37.1	0.1	0.27

Nota. Comparación entre las mediciones obtenidas por el sistema IoMT y los equipos utilizados como referencia durante la evaluación funcional del sistema.

Tabla 4
Indicadores estadísticos de desempeño del sistema IoMT respecto a los equipos de referencia.

Variable fisiológica	MAE	RMSE	Error relativo promedio (%)
Frecuencia cardíaca	1.00 bpm	1.15 bpm	1.19
Saturación de oxígeno	0.67 %	0.82 %	0.70
Temperatura corporal	0.10 °C	0.10 °C	0.27

Nota. MAE: Error Absoluto Medio; RMSE: Raíz del Error Cuadrático Medio.

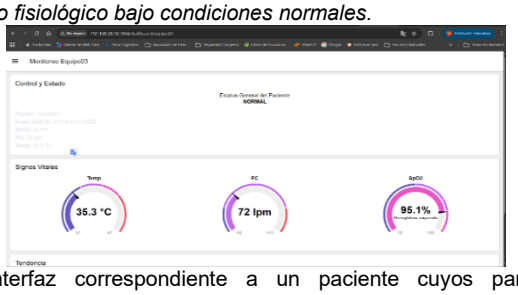
Los indicadores estadísticos muestran que el sistema presenta un comportamiento consistente respecto a los equipos de referencia. Los valores de MAE y RMSE permanecieron bajos para las tres variables fisiológicas evaluadas, lo que evidencia una adecuada estabilidad de medición y una desviación reducida entre las lecturas del sistema IoMT y los instrumentos utilizados como referencia. Estos resultados respaldan la factibilidad de emplear la arquitectura propuesta como plataforma de monitoreo continuo en aplicaciones hospitalarias de baja y mediana complejidad

Los resultados muestran una alta concordancia entre las mediciones obtenidas por la arquitectura propuesta y los valores registrados por los equipos de referencia. En la medición de frecuencia cardíaca se observaron diferencias máximas de un latido por minuto, correspondientes a errores relativos inferiores al 1.5 %, mientras que la estimación de la saturación periférica de oxígeno presentó errores cercanos al 1 %. En el caso de la temperatura corporal, la diferencia máxima registrada fue de 0.1 °C, equivalente a un error relativo aproximado del 0.3 %.

Desde el punto de vista clínico, estas diferencias se encuentran dentro de los márgenes de variación esperados para dispositivos de monitoreo no invasivo utilizados en aplicaciones de vigilancia fisiológica continua. Lo anterior indica que la integración del sensor MAX30102 para la estimación de frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno, así como del sensor DS18B20 para temperatura corporal, proporciona mediciones suficientemente consistentes para aplicaciones de monitoreo hospitalario en tiempo real.

La Figura 6 muestra la interfaz desarrollada para el monitoreo individual de un paciente, donde pueden observarse los parámetros fisiológicos adquiridos en tiempo real y las tendencias históricas registradas por el sistema.

Figura 6
Monitoreo fisiológico bajo condiciones normales.



Nota. Interfaz correspondiente a un paciente cuyos parámetros fisiológicos permanecen dentro de los rangos clínicos establecidos.

4.3 Evaluación de la supervisión multipaciente y capacidad de escalamiento

Uno de los principales objetivos del sistema desarrollado consistió en implementar una arquitectura capaz de supervisar simultáneamente múltiples pacientes desde una única estación central de enfermería, manteniendo tiempos de respuesta adecuados y garantizando la actualización continua de las variables fisiológicas. Para evaluar la capacidad de escalamiento de la infraestructura IoMT, se analizaron diferentes escenarios incrementando progresivamente el número de terminales conectadas a la red inalámbrica local.

La Tabla 5 presenta el comportamiento general del sistema conforme aumenta el número de nodos IoMT activos dentro de la infraestructura hospitalaria.

Tabla 5
Evaluación de la capacidad de escalamiento de la arquitectura IoMT.

Número de terminales	Actualización promedio (s)	Alertas detectadas	Disponibilidad (%)	Estado del sistema
1	1.00	2	100.0	Estable
2	1.02	4	100.0	Estable
3	1.05	6	99.9	Estable
4	1.09	8	99.8	Estable
5	1.13	10	99.7	Estable

Nota. Evaluación del comportamiento de la arquitectura a medida que aumenta el número de terminales IoMT conectados simultáneamente.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID009

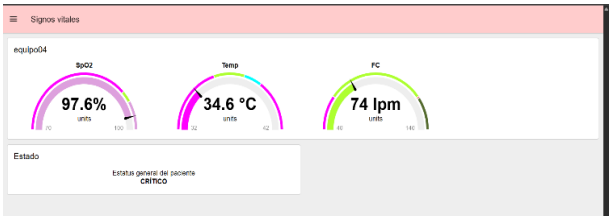
This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Los resultados muestran que el incremento en el número de terminales produjo únicamente un aumento gradual en el tiempo de actualización de la estación central, manteniéndose siempre cercano a un segundo. Este comportamiento indica que la infraestructura desarrollada conserva una respuesta adecuada para aplicaciones de monitoreo clínico continuo, donde las variables fisiológicas no presentan cambios instantáneos que requieran frecuencias de actualización del orden de milisegundos.

Asimismo, la disponibilidad del sistema permaneció superior al 99.7 % en todos los escenarios evaluados, evidenciando un funcionamiento estable de la arquitectura distribuida incluso cuando múltiples terminales transmitieron información de manera concurrente.

La Figura 7 presenta la interfaz de monitoreo individual implementada en Node-RED. En ella se muestran los indicadores instantáneos de frecuencia cardiaca, saturación periférica de oxígeno y temperatura corporal, así como el historial temporal de cada variable fisiológica.

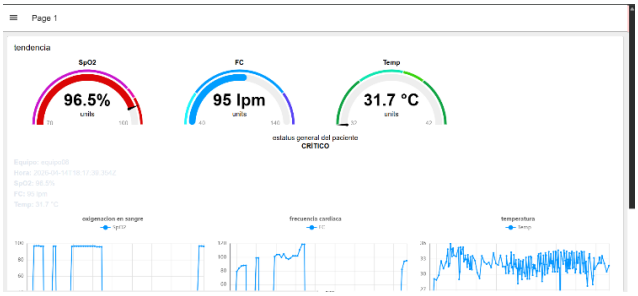
Figura 7
Detección automática de condición crítica.



Nota. La estación de monitoreo genera una alerta visual cuando los parámetros fisiológicos exceden los umbrales definidos para frecuencia cardiaca, saturación de oxígeno o temperatura corporal.

Por otra parte, la Figura 8 muestra la estación central de enfermería desarrollada para la supervisión simultánea de múltiples pacientes. La interfaz integra la información proveniente de todas las terminales IoMT conectadas a la red hospitalaria local, permitiendo visualizar de forma centralizada el estado clínico de cada paciente y facilitando la identificación inmediata de eventos que requieren atención médica.

Figura 8
Tendencias temporales de variables fisiológicas.



Nota. Visualización histórica de frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y temperatura corporal utilizada para el seguimiento clínico continuo del paciente.

Durante las pruebas de funcionamiento, la lógica implementada permitió identificar automáticamente condiciones compatibles con bradicardia, taquicardia, hipoxemia e hipertermia. Cuando alguno de estos eventos fue detectado, el sistema actualizó el estado clínico del paciente y generó alertas visuales en la estación central, reduciendo la necesidad de supervisión individual permanente por parte del personal de enfermería.

Desde la perspectiva de ingeniería, la arquitectura implementada demostró un comportamiento escalable, ya que el incremento progresivo del número de terminales produjo una degradación mínima en los tiempos de actualización y no comprometió la disponibilidad general del sistema. Estas características permiten considerar la propuesta como una plataforma adecuada para entornos hospitalarios de pequeña y mediana capacidad, donde el monitoreo continuo y la respuesta oportuna representan factores críticos para la atención del paciente.

4.4 Comparación con trabajos relacionados

Con el propósito de contextualizar la contribución de la arquitectura desarrollada, se realizó una comparación con trabajos recientes relacionados con sistemas IoMT para monitoreo de pacientes. El análisis consideró características funcionales ampliamente reportadas en la literatura, incluyendo la capacidad de supervisión multipaciente, el uso de procesamiento en el borde (Edge Computing), la dependencia de la conexión a Internet, los protocolos de comunicación empleados y el nivel de integración de la infraestructura. Los resultados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6
Comparación de la arquitectura propuesta con trabajos recientes sobre monitoreo IoMT.

Característica	Ahmed et al. (2024)	Ghubaish et al. (2023)	Wang et al. (2022)	Trabajo propuesto
Monitoreo multipaciente	No	Sí	Sí	**Sí**
Procesamiento local (*Edge Computing*)	No	Parcial	Sí	**Sí**
Operación sin conexión a Internet	No	No	No	**Sí**
Comunicación MQTT	Sí	Sí	Sí	**Sí**
Plataforma Node-RED	No	No	No	**Sí**
Red WiFi local independiente	No	No	Parcial	**Sí**
Arquitectura modular	Sí	Sí	Sí	**Sí**

Nota. Comparación elaborada a partir de las características reportadas en trabajos recientes relacionados con arquitecturas IoMT para monitoreo de pacientes.

Como puede observarse, la mayoría de las arquitecturas reportadas en la literatura utilizan plataformas basadas en la nube o requieren conectividad permanente a Internet para el procesamiento y almacenamiento de la información clínica. En contraste, la arquitectura propuesta integra el procesamiento local mediante una Raspberry Pi, permitiendo que todas las funciones de adquisición, comunicación, procesamiento y visualización se ejecuten dentro de la infraestructura hospitalaria.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID009

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Asimismo, la incorporación de Node-RED como plataforma de integración facilita la supervisión simultánea de múltiples pacientes mediante una interfaz unificada para el personal de enfermería, característica poco reportada en arquitecturas IoMT de bajo costo. La combinación de procesamiento local, comunicación mediante MQTT y operación sobre una red WiFi independiente constituye una alternativa orientada a incrementar la disponibilidad del sistema y reducir la dependencia de servicios externos, aspectos particularmente relevantes para hospitales rurales, clínicas comunitarias y escenarios de atención médica en contingencia.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que la propuesta desarrollada no solamente implementa una plataforma funcional para el monitoreo de signos vitales, sino que incorpora características arquitectónicas que favorecen la escalabilidad, disponibilidad y autonomía operativa del sistema, diferenciándose de diversas soluciones previamente reportadas.

4.5 Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la arquitectura propuesta constituye una alternativa técnicamente viable para el monitoreo distribuido de signos vitales en entornos hospitalarios con infraestructura tecnológica limitada. A diferencia de numerosas soluciones IoMT reportadas en la literatura, cuyo funcionamiento depende de plataformas en la nube o de servicios externos para el procesamiento de la información clínica, el sistema desarrollado concentra todas las funciones de adquisición, comunicación, procesamiento y visualización dentro de una infraestructura local basada en Edge Computing. Esta característica incrementa la disponibilidad operativa del sistema y reduce la dependencia de enlaces externos de comunicación, aspecto especialmente relevante para hospitales rurales, clínicas comunitarias y unidades médicas temporales.

Desde el punto de vista del desempeño de la red, la arquitectura mantuvo tiempos de respuesta estables conforme aumentó el número de terminales conectadas, mostrando un incremento gradual de la latencia sin afectar la continuidad del monitoreo. Este comportamiento indica que la implementación basada en MQTT y una red WiFi local proporciona una comunicación suficientemente eficiente para aplicaciones de vigilancia fisiológica, donde las variables monitoreadas presentan cambios relativamente lentos y no requieren frecuencias de actualización del orden de milisegundos.

La evaluación de la adquisición fisiológica mostró una elevada concordancia entre las mediciones obtenidas por el sistema IoMT y los equipos de referencia utilizados durante la validación. Los bajos valores de error porcentual, MAE y RMSE obtenidos para frecuencia cardiaca, saturación periférica de oxígeno y temperatura corporal respaldan la consistencia de la plataforma como herramienta de monitoreo continuo. Si bien el sistema no pretende sustituir equipos médicos certificados para diagnóstico, los resultados indican que puede emplearse como una solución de vigilancia clínica para la detección temprana de alteraciones fisiológicas y el apoyo a la toma de decisiones del personal de enfermería.

La comparación con trabajos recientes permitió identificar que la principal aportación de la propuesta radica en la integración de una arquitectura IoMT completamente local, capaz de operar sin conexión a Internet y orientada al monitoreo simultáneo de múltiples pacientes. Mientras que diversas investigaciones se enfocan en el desarrollo de dispositivos individuales o en plataformas dependientes de servicios en la nube, el sistema presentado incorpora una estación central de enfermería que concentra la información proveniente de múltiples terminales mediante una infraestructura distribuida basada en MQTT y Node-RED. Esta integración favorece la escalabilidad del sistema y simplifica su incorporación en ambientes hospitalarios de pequeña y mediana capacidad.

La Figura 9 muestra la interfaz de supervisión multipaciente implementada en la estación central de enfermería. La plataforma permite visualizar en tiempo real el estado fisiológico de todos los pacientes conectados, identificar tendencias históricas y generar alertas automáticas cuando alguno de los parámetros monitoreados excede los umbrales clínicos establecidos. Esta funcionalidad reduce la necesidad de supervisión individual continua y proporciona al personal de salud una visión global del estado de los pacientes bajo monitoreo.

Figura 9

Supervisión multipaciente desde la estación central de enfermería



Nota. Dashboard desarrollado para integrar la información proveniente de múltiples terminales IoMT conectadas a la red hospitalaria local.

Aunque los resultados obtenidos respaldan la viabilidad técnica de la arquitectura propuesta, el presente trabajo presenta algunas limitaciones. La validación se realizó bajo un entorno controlado y utilizando un número reducido de terminales IoMT, por lo que futuras investigaciones deberán considerar escenarios hospitalarios con un mayor número de pacientes, protocolos clínicos de mayor duración y evaluaciones con usuarios finales. Asimismo, será conveniente incorporar mecanismos de cifrado de extremo a extremo, autenticación de dispositivos y algoritmos de inteligencia artificial que permitan realizar análisis predictivos sobre las variables fisiológicas adquiridas.

En conjunto, los resultados demuestran que la arquitectura desarrollada ofrece una solución escalable, modular y de bajo costo para el monitoreo hospitalario de signos vitales, proporcionando una plataforma tecnológica con potencial para evolucionar hacia sistemas inteligentes de apoyo a la decisión clínica basados en análisis predictivo y procesamiento distribuido.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID009

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se diseñó, implementó y evaluó una arquitectura basada en el Internet de las Cosas Médicas (IoMT) para el monitoreo multipaciente de signos vitales en tiempo real, orientada a aplicaciones hospitalarias que requieren operación continua sin dependencia de servicios externos. La integración de terminales biomédicas basadas en ESP32, una infraestructura de comunicación mediante MQTT y una estación central implementada sobre Raspberry Pi y Node-RED permitió desarrollar una plataforma distribuida capaz de supervisar simultáneamente múltiples pacientes dentro de una red WiFi local.

La evaluación del sistema demostró que la arquitectura mantiene un comportamiento estable conforme aumenta el número de terminales conectadas, conservando tiempos de actualización adecuados para aplicaciones de monitoreo clínico y una alta disponibilidad de comunicación. Asimismo, la comparación de las mediciones obtenidas con equipos de referencia mostró errores reducidos en la estimación de frecuencia cardíaca, saturación periférica de oxígeno y temperatura corporal, lo que respalda la consistencia del sistema para tareas de vigilancia fisiológica continua.

Desde la perspectiva de ingeniería, la principal contribución de este trabajo radica en el desarrollo de una arquitectura IoMT completamente local, basada en principios de Edge Computing, capaz de integrar adquisición biomédica, comunicación inalámbrica y visualización centralizada sin requerir acceso a Internet. Esta característica representa una alternativa tecnológica de interés para hospitales rurales, clínicas comunitarias y escenarios donde la conectividad externa es limitada o inexistente.

Finalmente, la naturaleza modular de la plataforma facilita su evolución hacia sistemas hospitalarios inteligentes mediante la incorporación de mecanismos avanzados de ciberseguridad, interoperabilidad con estándares clínicos como HL7 FHIR y algoritmos de inteligencia artificial para el análisis predictivo de eventos fisiológicos. En este sentido, el sistema desarrollado constituye una base tecnológica sólida para futuras investigaciones orientadas a fortalecer la transformación digital de los servicios de salud mediante soluciones IoMT de bajo costo, escalables y adaptadas a las necesidades del entorno hospitalario.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, particularmente al programa educativo de Ingeniería Biomédica y al Laboratorio de Salud Digital y Biorobótica, por el apoyo académico, técnico y de infraestructura brindado para el desarrollo experimental de esta investigación. Asimismo, se reconoce la participación de estudiantes y docentes involucrados en las etapas de diseño electrónico, manufactura aditiva, integración de software embebido y validación funcional del sistema.

VII. REFERENCIAS

A, A., Dahan, F., Alroobaea, R., Alghamdi, Wael. Y., Mustafa Khaja Mohammed, Hajjej, F., Deema Mohammed Alsekait, & Raahemifar, K. (2023). A smart IoMT based architecture for E-healthcare patient monitoring system using artificial intelligence algorithms. *Frontiers in Physiology*, *14*, 1125952. https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1125952

Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *17*(4), 2347-2376. https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095

Chen, C.-M., Liu, S., Li, X., Islam, S. H., & Das, A. K. (2023). A provably-secure authenticated key agreement protocol for remote patient monitoring IoMT. *Journal of Systems Architecture*, *136*, 102831. https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2023.102831

Hassanalieragh, M., Page, A., Soyata, T., Sharma, G., Aktas, M., Mateos, G., Kantarci, B., & Andreescu, S. (2015). Health Monitoring and Management Using Internet-of-Things (IoT) Sensing with Cloud-Based Processing: Opportunities and Challenges. *2015 IEEE International Conference on Services Computing*, 285-292. https://doi.org/10.1109/SCC.2015.47

Huang, C., Wang, J., Wang, S., & Zhang, Y. (2023). Internet of medical things: A systematic review. *Neurocomputing*, *557*, 126719. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.126719

Kelly, J. T., Campbell, K. L., Gong, E., & Scuffham, P. (2020). The Internet of Things: Impact and Implications for Health Care Delivery. *Journal of Medical Internet Research*, *22*(11), e20135. https://doi.org/10.2196/20135

Naik, N. (2017). Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP. *2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, 1-7. https://doi.org/10.1109/SysEng.2017.8088251

Shaik, T., Tao, X., Higgins, N., Li, L., Gururajan, R., Zhou, X., & Acharya, U. R. (2023). Remote patient monitoring using artificial intelligence: Current state, applications, and challenges. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, *13*(2), e1485. https://doi.org/10.1002/widm.1485

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización [Conceptualization]	Mario Salvador Castro Zenil
2	Curación de datos [Data curation]	Guillermo Rey Peñaloza Mendoza]
3	Análisis formal [Formal analysis]	Mario Salvador Castro Zenil
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Luis Miguel Carreón Silva
5	Investigación [Investigation]	Mario Salvador Castro Zenil .
6	Methodología [Methodology]	Luis Miguel Carreón Silva
7	Administración del proyecto [Project administration]	Guillermo Rey Peñaloza Mendoza]
8	Recursos [Resources]	Luis Miguel Carreón Silva
9	Software [Software]	Mario Salvador Castro Zenil
10	Supervision [Supervision]	Guillermo Rey Peñaloza Mendoza]
11	Validación [Validation]	Guillermo Rey Peñaloza Mendoza]
12	Visualización [Visualization]	Luis Miguel Carreón Silva
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Mario Salvador Castro Zenil
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Mario Salvador Castro Zenil

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID009

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Estrés Laboral y Salud Mental: Factores de Riesgo en los Docentes del TecNM campus Zacatecas Occidente

Occupational Stress and Mental Health: Risk Factors among Teachers at TecNM Zacatecas Occidente

Rodríguez-Martínez, D.M.[1]; Ceseñas-Cordero, M.G.[2] ✉; Cuevas-Zapata, J.I.[3]; Ceceñas-Jacquez, M.I.[4]; Guzmán-Ayala, A.L.[5]

Datos de Adscripción:

[1] Rodríguez Martínez, Danna Montserrat
Tecnológico Nacional de México, sede Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente.
rodriguezdannamontserrat@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9040-8442

[2]✉ Ceseñas Cordero, María Guadalupe
Tecnológico Nacional de México, sede Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente.
mgcesenas@itszo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2863-617X

[3] Cuevas Zapata, Jessica Ivón
Tecnológico Nacional de México, sede Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente.
jcuevas@itszo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0339-5170

[4] Ceceñas Jacquez, Marco Iván
Tecnológico Nacional de México, sede Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente.
micecenas@itszo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8545-8798

[5] Guzmán Ayala, Ana Laura
Tecnológico Nacional de México sede Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente
aguzman@itszo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6047-5786

Resumen **- El entorno laboral se ha convertido en uno de los principales escenarios donde los trabajadores experimentan altos niveles de estrés. En el ámbito educativo, resulta fundamental visibilizar los factores que contribuyen al estrés laboral y su impacto en la salud mental. Este estudio tiene como propósito analizar la relación entre el estrés laboral y la salud mental de los docentes del Instituto Tecnológico Superior de Zacatecas Occidente, mediante la identificación de factores influyentes y la observación de síntomas que afectan el bienestar físico y psicológico. La investigación se desarrolla con un enfoque mixto, no experimental, descriptivo-correlacional y transversal. Se aplicaron encuestas a 30 profesores y entrevistas semiestructuradas a 7 de ellos, considerando los diferentes programas académicos. Los resultados evidencian factores como la carga laboral excesiva, la presión por resultados, la falta de reconocimiento y el escaso apoyo institucional, los cuales repercuten directamente en el bienestar psicológico y físico de los docentes. En cuanto al impacto en la salud mental, se identificaron síntomas frecuentes de ansiedad, agotamiento emocional y dificultades para mantener un adecuado equilibrio entre la vida personal y laboral. Estas condiciones afectan la motivación y el desempeño académico, generando un círculo de desgaste que compromete la calidad educativa. El análisis pone de manifiesto la necesidad de implementar estrategias de prevención, intervención y seguimiento que favorezcan un ambiente laboral más saludable. Asimismo, se destaca la importancia de fomentar la participación docente en la toma de decisiones, con el fin de fortalecer la calidad educativa y garantizar el bienestar integral de quienes desempeñan un papel fundamental en la formación de estudiantes.**

Palabras clave: Carga laboral, Docentes, Equilibrio vida personal-laboral, Estrés laboral, Salud mental.

Abstract **- The workplace has become one of the main settings where employees experience high levels of stress. In the educational field, it is essential to highlight the factors that contribute to work-related stress and its impact on mental health. This study aims to analyze the relationship between occupational stress and mental health among teachers at the Instituto Tecnológico Superior de Zacatecas Occidente, through the identification of influential factors and the observation of symptoms affecting physical and psychological well-being. The research follows a mixed-methods approach, non-experimental, descriptive-correlational, and cross-sectional in design. Surveys were conducted with 30 teachers and semi-structured interviews with 7 of them, considering different academic programs. The results reveal factors such as excessive workload, pressure to achieve results, lack of recognition, and limited institutional support, all of which directly affect the psychological and physical well-being of teachers. Regarding the impact on mental health, frequent symptoms of anxiety, emotional exhaustion, and difficulties in maintaining a proper balance between personal and professional life were identified. These conditions negatively influence motivation and academic performance, creating a cycle of strain that compromises educational quality. The analysis highlights the urgent need to implement prevention, intervention, and monitoring strategies that foster a healthier work environment. It also emphasizes the importance of encouraging teacher participation in decision-making processes, with the goal of strengthening educational quality and ensuring the integral well-being of those who play a fundamental role in student formation.**

Keywords: Mental health, Occupational stress, Teachers, Work-life balance, Workload.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID010

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito educativo, la salud mental del docente se ha consolidado como uno de los principales contextos de exposición a niveles críticos de estrés, con repercusiones directas en la salud mental y el bienestar humano e integral. Como lo menciona Miranda (2025), el estrés relacionado con el trabajo se considera una de las situaciones más presentes en la vida de un profesional de la educación, mostrando diversos síntomas como malestar mental, faltas laborales y disminución del rendimiento en los lugares de trabajo. La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2023) ha enunciado que los docentes manifiestan cierta reacción física y emocional asociada a las exigencias de las actividades académicas, laborales y personales que en ocasiones dañan de manera directa las capacidades de los empleados.

Desde eras muy antiguas, las actividades relacionadas al trabajo, ya se asociaban a enfermedades físicas, cognitivas y mentales, en épocas actuales, surgen enfermedades asociadas al estrés como la patología del siglo XXI, el cual impacta a una considerable porción de la población global. Se han hecho varios estudios en el ámbito de la educación, como lo mencionan Ortega et al. (2023) en su reseña de estudios realizados entre los años 2018 y 2023; se expone que los niveles de estrés laboral se ubican dentro de los niveles medio y medio alto en personas profesionales.

Este problema refleja una relevancia especial para las actividades relacionadas con el contacto humano, estudios desarrollados por Párraga y Escobar (2020), menciona que desde la pandemia por el cambio abrupto a virtualidad, se incrementa la ansiedad, agotamiento y desmotivación de los docentes, además, que los profesores no solo enfrentan exigencias administrativas, sino también la responsabilidad directa del proceso de enseñanza-aprendizaje, como lo menciona Vizuete y Moreira (2025), en la época moderna es un reto formar ciudadanos con pensamiento crítico, analítico y reflexivo, en un universo con un crecimiento exponencial y plural de saberes tecnológicos, donde el uso de plataformas digitales se encuentra en constante desarrollo y la utilización de internet se normaliza a un nivel preocupante.

Por otro lado, si se observa desde una perspectiva objetiva, el perfil del educador abarca a un individuo que ya posee características únicas y llega con ciertas capacidades, así como habilidades propias para generar sus procesos de formación profesional en el salón de clases, entender la dinámica de dicho entorno, elegir y estructurar los contenidos temáticos al contexto actual, promover estrategias didácticas y pedagógicas, así como diseñar una adecuada formulación de preguntas o el enriquecer las discusiones o debates controlados entre los estudiantes y fomentar el fortalecimiento de habilidades cognitivas avanzadas de los estudiantes siempre es un desafío docente (Navarrete, 2008).

Por lo anterior, según Linares (2014) es necesario contar con un acercamiento adecuado y oportuno con los aprendices, promover experiencias significativas, así como generar con los colegas y el resto de la institución donde labora un ambiente de respeto y cordialidad, sin embargo, entre docentes de la república de México, una de las fuentes de insatisfacción surge de la poca o nula participación para tomar decisiones en la institución que se labora, así como la baja inferencia en el desarrollo curricular de las asignaturas con las que se trabaja de forma diaria, si a eso se añade la poca convivencia con docentes afines al perfil docente, se tiene una experiencia poco grata.

El contexto educativo en América Latina también revela la escasez de compromiso y entusiasmo por parte de los alumnos hacia las actividades educativas, la carencia de administración institucional para abordar los problemas existentes como la escasez de recursos básicos y la insuficiente compensación económica, todos estos factores inciden en la desmotivación relacionada con el acto de enseñar, lo que a su vez propicia la manifestación de síntomas de ansiedad, estrés dentro y fuera del aula generando como consecuencia en ocasiones la depresión (Vizuete y Moreira, 2025).

Esta situación no está ajena a lo que presentan los maestros del TecNM campus Zacatecas Occidente, por lo que la presente investigación tiene el propósito de efectuar el análisis de la relación entre el estrés laboral y la salud mental de su personal docente. El estrés docente se manifiesta como un proceso progresivo de desgaste que transforma un estado inicial de bienestar integral en una percepción sostenida de presión y tensión.

Aunado a ello, el estrés del docente surge de la interacción entre el entorno de trabajo y la respuesta individual; es decir, cada profesional llega al aula con una carga académica, emocional y mental que debe controlar previo a iniciar una sesión académica. Las estrategias de afrontamiento determinan si los efectos del estrés se mitigan o se agravan. En este proceso, la personalidad se sitúa como el eje central: los valores y actitudes propios de cada persona son los que finalmente dictan su capacidad para resistir o sucumbir ante las demandas de un entorno cada vez más dinámico y exigente (Valadez et al., 2022).

Ante esta situación, la presente investigación busca responder a las interrogantes fundamentales: ¿Qué relación existe entre los niveles de estrés laboral y los problemas de salud mental en los docentes? y ¿Cuáles son los factores laborales que influyen negativamente en su bienestar?, se desarrolla mediante un enfoque mixto y un diseño descriptivo-correlacional, este trabajo identifica factores críticos como la sobrecarga de trabajo, los plazos inflexibles y la falta de apoyo organizacional, proponiendo finalmente estrategias de intervención que favorezcan un ambiente laboral más saludable y humano.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

El desarrollo de este estudio fue posible considerando los siguientes elementos sustanciales dentro del proceso metodológico, logrando garantizar la validez y sistematicidad de la información.

2. Metodología

El enfoque de la metodología es mixto; según Hernández-Sampieri et al. (2014), estos métodos representan un conjunto de técnicas sistemáticas, empíricas y críticas de investigación e implican la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID010

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Para el estudio, el enfoque cuantitativo permite identificar y medir los factores laborales asociados al estrés, así como su impacto en indicadores de salud mental, como lo afirma Campos (2025). El enfoque cualitativo complementa el análisis mediante la exploración de percepciones subjetivas relacionadas con las situaciones laborales y el bienestar psicológico. El enfoque cuantitativo tiene por objetivo medir los niveles de estrés laboral y salud mental de los maestros a lo largo del tiempo.

2.1 Población, muestra y justificación del muestreo

La población total (censo) estuvo constituida por 44 profesores frente a grupo adscritos a los diferentes programas académicos del Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente (ITSZO), los cuales están distribuidos de la siguiente manera:

- Licenciatura en Administración: 5 docentes.
- Ingeniería Industrial: 8.
- Ingeniería en Gestión Empresarial: 8.
- Ingeniería en Sistemas Computacionales e Ingeniería en Informática: 8.
- Ingeniería en Agronomía: 3.
- Ingeniería en Minería: 4.
- Ciencias Básicas: 8.

Sin embargo, la muestra final efectiva quedó integrada por 30 docentes que respondieron el instrumento (68.18% de la población total). Los 14 docentes restantes no participaron debido a criterios de exclusión como licencias médicas, vacaciones o bajas temporales al momento de la recolección de los datos.

La fase cualitativa se fundamentó en una muestra no probabilística, seleccionada mediante un muestreo por conveniencia, el cual consiste en la elección de casos que son accesibles para el investigador (Battaglia, 2008).

La muestra se fijó bajo un criterio de representatividad estructural por academia, seleccionando a 7 docentes que representan a los diversos programas académicos de la institución, con el propósito de obtener una comprensión profunda del fenómeno del estrés desde la perspectiva de sus actores. El tamaño de la muestra se justifica bajo el criterio de saturación de categorías, punto en el cual los testimonios recolectados ya no aportaban información novedosa para el entendimiento de los factores estresantes del entorno laboral (Hernández-Sampieri et al. 2014)

2.2 Instrumentos y validación

Para la recolección de los datos cuantitativos se diseñó un cuestionario estructurado en escala de Likert (1 = Totalmente en desacuerdo, 5 = Totalmente de acuerdo). El cuestionario está dividido en 3 categorías:

1. Carga laboral: los cuestionamientos tienen que ver con las tareas asignadas a los profesores, ambiente laboral, apoyo o no de los jefes directos, exigencias que superan las capacidades o recursos disponibles con los que cuenta el profesor.
2. Bienestar y desempeño personal: en esta parte se cuestiona si el docente se siente presionado en el trabajo, si el estrés le afecta en su descanso y si le falta motivación o energía para comenzar sus actividades laborales.
3. Vida-trabajo: esta parte habla sobre si el maestro tiene tiempo suficiente para atender sus asuntos personales, es decir, que la carga laboral no esté interfiriendo con llevar una vida personal favorable.

El componente cualitativo se abordó mediante una guía de entrevista semiestructurada orientada a explorar las narrativas individuales sobre la jornada laboral, considerando los principales factores estresantes, el impacto que tienen en su bienestar y desempeño, cambios recientes en su motivación o estado de ánimo, las estrategias de afrontamiento, y las demandas institucionales. Esta investigación aborda la salud mental como un constructo de percepción subjetiva. Según Hernández-Sampieri et al. (2014), hay una realidad interna y consiste en las creencias, suposiciones y experiencias subjetivas de los individuos, que pueden ir desde muy vagas o generales.

Al emplear un enfoque mixto, y como ya se mencionó anteriormente, se prioriza la profundidad interpretativa y la intersubjetividad, lo que permite que los docentes narren sus propias experiencias sobre los síntomas de agotamiento y estrés, desde su propia perspectiva y contexto, ya que pueden percibir de manera diferente según sus actividades laborales y entorno familiar.

Para garantizar la confiabilidad del instrumento, se procedió a calcular el coeficiente alfa de Cronbach, reconocido por González y Santacruz (2015) en el paquete estadístico SPSS, el cual resultó con un valor de 0.72. Según Hernández-Sampieri et al. (2014), se considera aceptable y robusto para investigaciones en ciencias sociales, donde los valores superiores a 0.70 indican que las respuestas a los cuestionamientos del instrumento son coherentes y miden de manera consistente el constructo de estrés laboral.

Por otro lado, para asegurar que los ítems cualitativos y cuantitativos representen verdaderamente el constructo de estrés laboral y salud mental en el entorno docente, se procedió a establecer su validez de contenido mediante juicio de expertos, los cuales son dos doctores pertenecientes al SNII y al departamento de psicología del ITSZO. Siguiendo las recomendaciones de los expertos, se eliminaron ambigüedades y se refinaron los reactivos para asegurar su pertinencia.

Este procedimiento, sumado al valor de 0.72 en el alfa de Cronbach obtenido, otorga al instrumento el rigor metodológico necesario, mostrando que es confiable y válido en cuanto a su contenido para los fines de este estudio.

2.3 Análisis de correlación

Para dar cumplimiento al alcance correlacional del estudio y determinar el nivel de asociación entre las variables estrés laboral y salud mental, se procedió a utilizar el coeficiente de

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID010

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

correlación de Spearman (ρ). Esta elección se justifica bajo los criterios de Hernández-Sampieri et al. (2014) por lo siguiente:

1. Nivel de medición ordinal: Debido a que los datos se recolectaron mediante un instrumento con escala tipo Likert, la cual es considerada por diversos autores como medición de tipo ordinal, el coeficiente de Spearman es la prueba estadística apropiada para relacionar las variables.
2. Naturaleza no paramétrica: Al ser una prueba no paramétrica, el coeficiente de Spearman no requiere presupuestos acerca de la distribución poblacional, lo cual es común en estudios de comportamiento humano y percepciones subjetivas.
3. Flexibilidad en la relación entre variables: A diferencia de otras pruebas, el coeficiente de Spearman es efectivo no solo en relaciones lineales, sino también para analizar relaciones curvilíneas, permitiendo una interpretación más fiel de cómo fluctúa una variable en función de la otra sin forzar el modelo a una línea recta.

El valor del coeficiente se interpretará en un rango de -1.00 (correlación negativa perfecta) a +1.00 (correlación positiva perfecta), considerando un nivel de significancia de 0.05 como límite mínimo para la aceptación de la hipótesis de investigación.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al analizar las respuestas de los 30 profesores encuestados, más los comentarios de 7 docentes (entrevistados al azar), se muestran patrones consistentes que permiten identificar los principales factores laborales asociados al estrés. Entre las respuestas más relevantes se observa que existen niveles moderados a altos de carga laboral, percepción de presión por la obtención de resultados, falta de reconocimiento y experiencias de agotamiento emocional, lo que provoca que los docentes carezcan de energía o motivación para iniciar sus actividades de manera positiva.

De igual manera, se identifican señales asociadas al impacto del estrés en la salud mental, como síntomas de ansiedad, tensión constante, dificultades para desconectarse del trabajo y disminución en la motivación o el desempeño laboral, además de señales visibles de problemas de salud (cardíacos, digestivos, alteración de sueño, dolores musculares, etc.), características asociadas con la falta de salud mental y cognitiva, así como alteraciones del sistema inmunológico, este dato se considera un factor interesante que es necesario profundizar.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de cada categoría

3.1 Categoría 1. Carga laboral

De acuerdo con la NOM-035, este factor se relaciona con el volumen y la intensidad del trabajo asignado, la presión de tiempo y la capacidad del trabajador para cumplir con sus responsabilidades. Se busca identificar si las exigencias laborales sobrepasan los recursos o tiempos disponibles.

Figura 1
Edad de los docentes encuestados



En relación a la edad de los encuestados como se observa en la figura 1, se tiene que el 43.3% de los docentes oscila entre 41-45 años considerados en etapa de adultez media, con estabilidad y experiencia tanto laboral como profesional acumulada, seguido de un 26.7% que oscila en un rango de edad entre 36-40 años de edad se encuentran en la etapa de transición hacia la adultez media, consolidando experiencias profesionales y en tercera instancia con igual índice del 10% se cuente con los docentes de entre 31-35 años y 46-50 años.

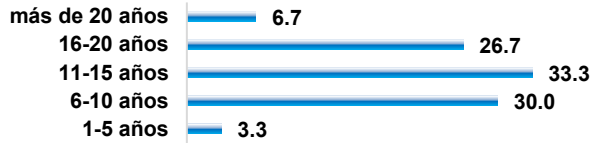
Lo anterior permite identificar que la mayor parte de los docentes encuestados cuenta con una adultez joven y de mediana edad en la institución, representando un equilibrio entre la juventud y experiencia laboral y profesional requerida para favorecer el intercambio de conocimientos entre los estudiantes de las diferentes generaciones.

Figura 2
Género



Referente al género de los docentes del TecNM campus Zacatecas Occidente que fueron encuestados, se tiene que fue una mayor cantidad de personal femenino con un 56.7% en comparación con el 43.3% que fue respondido por el personal masculino, como lo muestra la figura 2.

Figura 3
Antigüedad en la institución (en años)



La antigüedad de los docentes en la institución es un factor importante, como se observa en la figura 3. Al determinar que la antigüedad laboral es diversa, se tiene que el mayor porcentaje, 33.3%, se encuentra concentrado en docentes que ya cuentan con 11 a 15 años dentro de la institución.

Este dato es considerado como importante, debido a que permite identificar la forma en que experimentan y perciben el estrés laboral, al sentirse más comprometidos por su experiencia en las aulas frente a los estudiantes, al contar con mayor antigüedad podrían enfrentar presiones distintas a diferencia de los docentes con menos años laborando y que posiblemente cuentan con menor sentido de pertenencia a la institución educativa.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID010

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Tabla 1
Carga académica o administrativa

	Frecuencia	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	2	6.7
En desacuerdo	2	6.7
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3	10.0
De acuerdo	10	33.3
Totalmente de acuerdo	13	43.3
Total	30	100.0

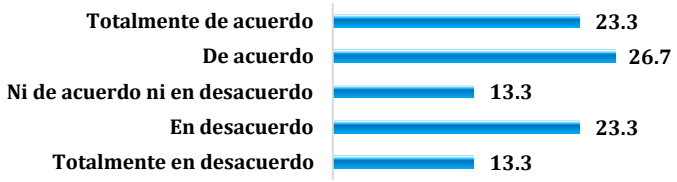
En relación a la carga académica a la que se enfrentan los docentes, es considerada mayor como se observa en la tabla 1, en donde el 43% de los encuestados señala que tienen más actividades académicas o administrativas en el horario laboral de las que realmente pueden gestionar en su tiempo disponible, considerando que además en la mayoría de los semestres les añaden actividades no contempladas en su carga académica, contribuyendo de manera considerable a una sobrecarga, este situación a largo plazo termina por afectar de manera negativa el rendimiento físico y mental, traducido en una disminución de la calidad de vida de los docentes.

Figura 4
Participación limitada en decisiones



La participación del cuerpo docente en las decisiones referentes a su trabajo es limitada, como se puede observar en la figura 4, siendo que los docentes son considerados como el pilar fundamental en la institución, se les otorga poca participación para la toma de decisiones, excluyendo no solo las ideas que en su momento se puedan externar, sino aquellas estrategias de mejora que permitan realizar cambios en su práctica docente, así como propuestas a la rehabilitación o construcción de la infraestructura necesaria para desempeñar de una mejor forma sus propias actividades inherentes a la impartición de clases con el afán de mejorar la calidad educativa para los estudiantes.

Figura 5
Ambiente laboral



El ambiente laboral es considerado como parte medular para el desarrollo adecuado de las actividades docentes en la institución; sin embargo, este es percibido por más de la mitad de los docentes entrevistados como tenso, como lo muestra la figura 5, lo cual se traduce en un elemento negativo de la motivación, comunicación y trabajo en equipo, impactando incluso en las relaciones entre los compañeros, desempeño académico e integración entre el personal de la propia institución educativa.

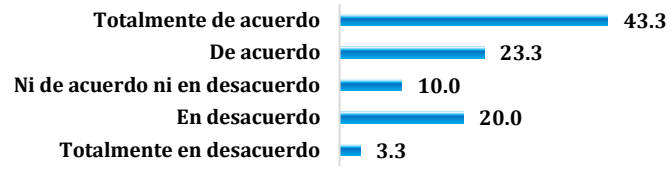
Tabla 2
Apoyo al docente

	Frecuencia	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	4	13.3
En desacuerdo	5	16.7
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	8	26.7
De acuerdo	6	20.0
Totalmente de acuerdo	7	23.3
Total	30	100.0

El apoyo que se recibe por parte de la dirección o coordinación académica es poco, se observa en la tabla 2 no se tiene una percepción homogénea entre los encuestados, la mayoría opta por mantener una postura neutral 27%, al unificar a quienes están de acuerdo y totalmente de acuerdo se tiene un 43% en recibir poco apoyo, esto evidencia la falta de áreas de oportunidad y el escaso respaldo para llevar a cabo ciertas actividades que requieren recursos económicos, como la publicación de artículos o la compra de materiales para hacer investigación. En contraste, el 30% manifiesta recibir apoyos.

En este contexto, se considera que esta falta de respaldo por las autoridades educativas repercute de manera directa en la motivación, el clima laboral e incluso limita la participación de los docentes en otras actividades inherentes a su formación profesional.

Figura 6
Exigencia laboral



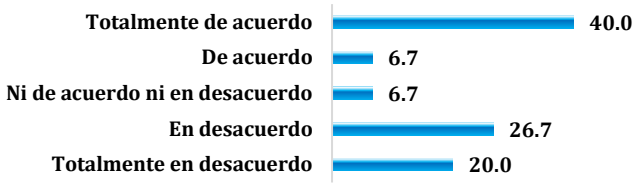
Respecto a las exigencias laborales, los docentes señalan como se observa en la figura 6 que éstas exceden los recursos o el tiempo disponible con el que cuentan para llevar a cabo las actividades de manera adecuada con un 43.3%, aunado con la falta de apoyo por parte del área administrativa, se pudiera reflejar en la sobrecarga laboral, baja motivación y desempeño profesional, esto puede convertirse en factores de riesgo psicosocial como son la carga laboral, que afecten de manera directa a los profesores en su salud mental.
Este resultado refleja la necesidad de fortalecer estrategias institucionales que permitan realizar una adecuada distribución de las actividades para evitar sobrecargar a los docentes.
En cuanto al bienestar y el desempeño del profesor, según la NOM-035, se ven afectados por la presión constante, la falta de concentración o el agotamiento derivado del trabajo.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID010

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Respecto a lo anterior, se tiene:

Figura 7
Presión laboral



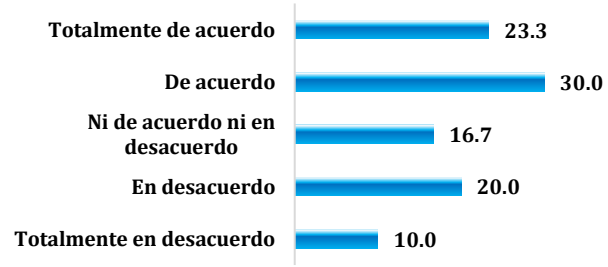
En la figura 7, se observan opiniones diversas respecto a la presión; unificando valores, se muestra el mismo porcentaje de sentirse presionado en un 46.7%, con el estar en desacuerdo con la presión laboral. Esto surge de la distribución de la carga laboral poco equilibrada, excesivos trámites administrativos, poco tiempo para realizar las actividades asignadas, siendo estos factores condicionantes para un bajo desempeño docente y bienestar emocional. A pesar de que hay docentes que no perciben esta presión.

Tabla 3
Sentido de agotamiento

	Frecuencia	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	2	6.7
En desacuerdo	3	10.0
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3	10.0
De acuerdo	11	36.7
Totalmente de acuerdo	11	36.7
Total	30	100.0

El 73% de los docentes encuestados mencionan que se sienten agotados al terminar su jornada laboral como se detalla en la tabla 3, esto infiere en el desgaste físico y mental, derivado de una carga laboral excesiva, poco tiempo para desempeñar las actividades, presión laboral y estrés constante, esto repercute de manera significativa en la motivación y por ende en un bajo rendimiento del docente al realizar sus actividades, en contraste con los pocos profesores que no sienten ese nivel de agotamiento.

Figura 8
Calidad de descanso

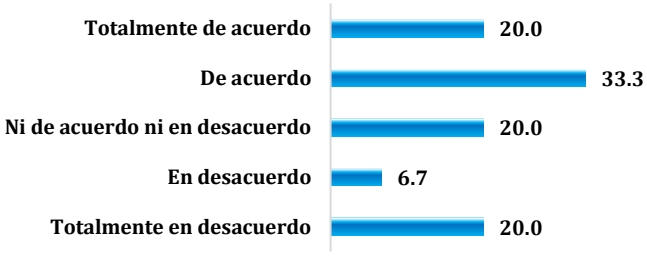


En relación a la calidad del descanso se tiene que el 53% de los docentes entrevistados responden que se ve afectado por las constantes preocupaciones laborales, como se puede apreciar en la figura 8, derivado de la poca desconexión de los pendientes que se tienen por no tener cubiertas las actividades asignadas, un 30% menciona que su calidad de vida no es afectada por las responsabilidades.

De manera general, se tiene que la calidad del descanso derivado de las preocupaciones laborales tiene una repercusión en la motivación, aunada a un continuo bajo rendimiento físico y mental.

Si se tiene como estrategia prioritaria la implementación de la NOM-035, que valora la relevancia del equilibrio entre la vida profesional y la vida personal, para prevenir riesgos psicosociales, los datos mencionados con anterioridad generan una alerta importante en la medición del equilibrio de la vida personal del docente que labora en un Instituto de Educación Superior.

Figura 9
Equilibrio vida personal-laboral



Referente al equilibrio que se tiene entre la vida personal-laboral, se observa en la figura 9 que el 53% del personal docente encuestado percibe que su trabajo interfiere con su vida personal, derivado de que el trabajo no termina en la institución, sino que se lo llevan a casa, esto ocasionado por las cargas excesivas de trabajo, baja concentración en la escuela o dificultades para mantener el equilibrio en el tiempo personal y laboral.

Tabla 4
Desconexión mental del trabajo

	Frecuencia	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	10	33.3
En desacuerdo	4	13.3
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	7	23.3
De acuerdo	4	13.3
Totalmente de acuerdo	5	16.7
Total	30	100.0

En relación a la desconexión en el tiempo libre de los docentes, se muestra en la tabla 4 que el 47% de los docentes no pueden desconectarse mentalmente del trabajo en su tiempo libre, como ya se había mencionado en la figura anterior, llevan trabajo a casa, aunque ya están fuera de la jornada laboral, siguen haciendo trabajo pendiente, siendo el reflejo del estrés laboral por no cumplir las actividades a tiempo, aunado a la alta carga emocional en sus labores docentes.
En cuanto al análisis de Correlación estadística y para dar cumplimiento al alcance correlacional planteado en los objetivos de la investigación y determinar la relación entre las exigencias

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID010

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

del entorno del trabajo y la salud mental, se aplicó el coeficiente de correlación no paramétrico de Spearman (ρ), sobre las dimensiones promediadas de los constructos de Carga laboral (promedio_1) y Afectación al bienestar/Agotamiento (promedio_2), el análisis se llevó a cabo en el paquete estadístico SPSS dando el siguiente resultado:

Tabla 5
Análisis de correlación

Correlaciones				
			promedio_1	promedio_2
Rho de Spearman	promedio_1	Coeficiente de correlación	1	.811**
		Sig. (bilateral)	.	0
		N	30	30
	promedio_2	Coeficiente de correlación	.811**	1
		Sig. (bilateral)	0	.
		N	30	30

**. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Los resultados del análisis bivariado revelaron la existencia de una correlación positiva muy fuerte y estadísticamente significativa (ρ = 0.811, $p < 0.001$, N =30). El resultado obtenido permite observar que al incrementar las actividades académicas y administrativas, la presión del tiempo y el trabajo dentro del aula de clases se asocian de manera directa y proporcional, expresando síntomas de agotamiento y afectación en la calidad del descanso. Este hallazgo aporta evidencia estadística de que las exigencias laborales son un factor crítico de riesgo para el deterioro de la salud mental de los docentes en la institución.

3.2 Discusión

El análisis cuantitativo y cualitativo de esta investigación permite comprender mejor el estrés laboral en el contexto del ITSZO. El resultado estadístico más contundente fue la identificación de una correlación positiva muy fuerte superior a 0.80, lo que supera los niveles asociados reportados en las investigaciones previas como las realizadas por Vizuete y Moreira (2025) y Párraga et al. (2020), donde señalaban que la sobrecarga académica operaba como un estresor relevante, pero a niveles más bajos. Los resultados observados en la presente investigación demuestran que, a mayores exigencias institucionales, administrativas y de atención frente a grupo, se desencadena un incremento crítico en las manifestaciones de agotamiento psicológico, dificultades en el descanso y presiones físicas. Esto permite entrelazar los testimonios recabados de los 7 docentes representantes de las diferentes academias, ya que se explica el porqué de este elevado índice de correlación (0.811) en las entrevistas semiestructuradas, pues manifestaron de manera recurrente la imposibilidad de delimitar los tiempos de la jornada laboral oficial, debido a la carga administrativa emergente, lo que los obliga a llevarse el trabajo a casa, interfiriendo en su vida personal y familiar.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que el personal docente del ITSZO que participa en el estudio tiene una edad adulta joven y adultez madura, y presenta niveles significativos de estrés laboral que afectan directamente su salud mental, física y emocional. El 46.7% de las personas que responden a la investigación comentan sentirse constantemente presionadas en sus actividades diarias derivadas del poco tiempo disponible para gestionar las actividades académicas. Esta situación genera que la calidad de sus descansos ocasione un agotamiento acumulado al finalizar la jornada. Además, se observa que gran parte del personal no logra mantener un orden saludable entre su vida laboral y personal, situación que incrementa la tensión, disminuye la motivación y eleva el riesgo de deterioro de la calidad de vida personal, así como profesional.

En términos de salud, la falta de equilibrio, la sobrecarga de trabajo y la presión constante evidencian la presencia de factores de riesgo psicosocial que la institución no está identificando, previniendo ni atendiendo adecuadamente, a pesar de ser obligaciones establecidas en la NOM-035-STPS-2018. Dichos factores no solo intensifican el riesgo de estrés crónico y burnout, sino también de problemas emocionales y físicos como ansiedad, depresión, alteraciones del sueño, dolores de cabeza, hipertensión y otros padecimientos asociados al desgaste laboral.

Es fundamental reconocer que, dentro de cualquier institución educativa, el personal docente constituye un pilar tan importante como los estudiantes, ya que de ellos depende el desarrollo académico, la formación profesional y el acompañamiento integral del alumnado. Cuidar de los profesores no es un acto voluntario o secundario, sino una obligación institucional sustentada en la normatividad vigente.
Por lo tanto, esta evidencia confirma la necesidad urgente de que la institución implemente medidas formales de prevención, intervención y seguimiento, tales como una distribución equitativa de cargas laborales, horarios razonables, mecanismos de evaluación del riesgo psicosocial, fortalecimiento de redes de apoyo y políticas claras que promuevan el descanso, la desconexión digital y el bienestar docente. Cumplir con estos lineamientos no solo es indispensable para proteger la salud del personal, sino también para asegurar un ambiente laboral humano, sostenible y conforme a la normativa.

4.1 Recomendaciones

Medidas de control basadas en resultados de acuerdo a la NOM-035-STPS-2018

- Redistribución de cargas laborales
  - Ajustar horarios y número de grupos cuando se detecte sobrecarga o estrés significativo.
  - Diseñar un calendario que evite bloques consecutivos de más de 2 horas sin descanso.

- Atención especializada
  - Ofrecer apoyo psicológico externo o crear convenios externos con instituciones psicológicas.
  - Talleres grupales de manejo de estrés.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID010

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

- Brindar seguimiento a docentes con indicadores de estrés, ansiedad o agotamiento.

● Intervención inmediata en ambientes conflictivos

Cuando haya grupos que generen desgaste emocional severo, implementar acompañamiento, tutorías, mediación o rotación temporal para proteger la salud del docente.

● Estrategias Institucionales de Activación Física

- Programas de activación física durante la jornada
- Capacitar al personal para dirigir pausas activas de 3–5 minutos en distintos turnos.
- Llevarlos a hacer yoga, estiramiento, movilidad articular, caminatas o actividad física ligera dentro del plantel una vez cada semana.

● Estrategias de cuidado de la voz

- Inclusión de metodologías donde los alumnos trabajen más en equipo, reduciendo el tiempo de voz continua del docente.
- Ofrecer talleres con especialistas en foniatría o expresión oral para enseñar técnica vocal adecuada.

● Cuidado visual

- Ajustar iluminación de salones (ni demasiado tenue ni excesivamente brillante).
- Colocar cortinas o filtros en ventanas para evitar deslumbramiento.

● Estrategias Psicosociales y Emocionales. Programa de prevención de riesgos psicosociales (alineado a NOM-035)

- Aplicar evaluaciones periódicas.
- Atender los resultados con acciones reales: redistribución de carga, apoyo emocional, seguimiento personalizado.
- Fomento del clima laboral positivo
- Actividades que fortalezcan la convivencia entre docentes.
- Programas de reconocimiento institucional.
-

● Estrategias de Gestión y Políticas Institucionales

- Política institucional de bienestar docente: Documento formal donde se establezcan derechos, tiempos de descanso, pausas activas y protocolos ergonómicos.
- Supervisión y cumplimiento: Un comité interno de salud laboral encargado de verificar que se respeten las pausas, la carga horaria y el uso de equipo ergonómico.

V. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México sede Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente, por los medios proporcionados para la realización de este estudio. Asimismo a los docentes que amablemente proporcionaron la información necesaria para llevar a cabo el estudio.

VI. REFERENCIAS

Battaglia, M. P. (2008). Convenience sampling. *Encyclopedia Of Survey Research Methods.* https://doi.org/10.4135/9781412963947.n105

Campos, A. (Coord.). (2025). Entorno universitario e intención emprendedora: un enfoque cuantitativo. (1. ed.). *Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Innovación* (AMIDI). https://elibro.net/es/ereader/itszo/293374?page=196

González, J. A., y Santacruz, M. (2015). Cálculo e interpretación del Alfa de Cronbach para el caso de validación de la consistencia interna de un cuestionario, con dos posibles escalas tipo Likert. Revista Publicando, 2(2), 62-77. https://revistapublicando.org/revista/index.php/crv/article/view/22

Linares, O. L. (2014). "Influencia del estrés, ansiedad y apoyo en el trabajo sobre el nivel de satisfacción laboral, malestar físico y ausentismo en profesores". [Tesis de doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México. https://repositorio.unam.mx/contenidos/74932

Mexicana, NOM (2018). NOM-035-STPS-2018. Factores de riesgo psicosocial. https://skillsinnovation.mx/wp-content/uploads/2023/07/NOM-035.pdf

Miranda, L. A. (2025). Estrés laboral y su incidencia en el personal de las instituciones gubernamentales de Sonora (México): análisis jurídico y psicosocial desde la Ley Federal del Trabajo. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(5), 9345-9366. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5.20265

Navarrete, Z., (2008). Construcción de una identidad profesional: los pedagogos de la Universidad Nacional Autónoma de México y de la Universidad Veracruzana. Revista Mexicana de Investigación Educativa, 13 (36), 143-171. https://www.redalyc.org/pdf/140/14003607.pdf

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2023). Entornos laborales saludables y bienestar mental.

Ortega, M., Hernández, Z. J., Barraza, A., Colunga, C., y Hernández, A. E. (2023). *El estrés laboral en docentes: reseña de estudios realizados entre el año 2018 y 2023.* Editorial UPD. https://editorialupd.mx/index.php/libros/catalog/book/2

Párraga, K. L. y Escobar, G. R. (2020). Estrés laboral en docentes de educación básica por el cambio de modalidad de estudio presencial a virtual. *Revista Científica Multidisciplinaria Arbitrada Yachasun*, 4 (7), 142-155. https://doi.org/10.46296/yc.v4i7edesp.0067

Hernández-Sampieri, R., Collado, C. F., Lucio, P. B., Valencia, S. M., y Torres, C. P. M. (2014). *Metodología de la investigación (6ª ed.). McGraw-Hill*.

Valadez, A., Bravo, M. C. y Vaquero, J. E. (2022). Estrés laboral. Síndrome de Burnout. *Estrategias de afrontamiento en docentes universitarios*: (1. ed.). Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). https://elibro.net/es/ereader/itszo/278757

Vizuete, C. D., y Moreira, E. L. (2025). Riesgos psicosociales y estrés laboral en los docentes Mendive. *Revista de Educación, 23(2),* e4116. https://mendive.upr.edu.cu/index.php/MendiveUPR/article/view/4116

World Health Organization: WHO. (2025, 30 septiembre). Trastornos mentales. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización	Danna Montserrat Rodríguez Martínez
2	Curación de datos	Marco Iván Ceceñas Jacquez
3	Análisis formal	María Guadalupe Ceseñas Cordero y Ana Laura Guzmán Ayala
4	Obtención de fondos	No aplica. Para esta investigación no se pidió apoyo financiero
5	Investigación	Jessica Ivón Cuevas Zapata y Danna Montserrat Rodríguez Martínez
6	Methodología	María Guadalupe Ceseñas Cordero y Ana Laura Guzmán Ayala
7	Administración del proyecto	Marco Iván Ceceñas Jacquez
8	Recursos	Jessica Ivón Cuevas Zapata
9	Software	María Guadalupe Ceseñas Cordero y Ana Laura Guzmán Ayala
10	Supervision	Marco Iván Ceceñas Jacquez.
11	Validación	Jessica Ivón Cuevas Zapata
12	Visualización	Jessica Ivón Cuevas Zapata y Ana Laura Guzmán Ayala
13	Redacción - borrador original	María Guadalupe Ceseñas Cordero y Jessica Ivón Cuevas Zapata
14	Redacción - revisión y edición	Marco Iván Ceceñas Jacquez.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID010

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Evaluación del Impacto de Generación Distribuida Fotovoltaica y Almacenamiento en Baterías en el Perfil de Tensión de una Red de Distribución IEEE de 34 Nodos

Evaluation of the Impact of Photovoltaic Distributed Generation and Battery Energy Storage on the Voltage Profile of an IEEE 34-Node Distribution Network

Martínez-Álvarez, M. M.[1]; Muñoz-Castillo, R. A.[2]; Hernández-Flores, C.[3]; Arjona-López, M. A.[4]

Datos de adscripción

[1] ✉ Martínez Álvarez, María Montserrat
Instituto Tecnológico de la Laguna. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: https://ror.org/00xbw4a70
m.mmartineza@ieee.org
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3540-1668

[2] Muñoz Castillo, Rubén Ángel
Instituto Tecnológico de la Laguna. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: https://ror.org/00xbw4a70
rubenm.castillo@ieee.org
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0362-3495

[3] Hernández Flores, Concepción
Instituto Tecnológico de la Laguna. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: https://ror.org/00xbw4a70
coni.hernandez@ieee.org
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4757-5309

[4] Arjona López, Marco Antonio
Instituto Tecnológico de la Laguna. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: https://ror.org/00xbw4a70
marjona@ieee.org
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1826-4066

Resumen **- La incorporación de generación distribuida (GD) en redes de distribución modifica el perfil de tensión, los flujos de potencia y las pérdidas eléctricas, con impactos más significativos en los alimentadores radiales en condiciones desbalanceadas. Este artículo analiza la integración de GD mediante dos recursos específicos: un sistema fotovoltaico (PV) y un sistema de almacenamiento de baterías (BESS), conectados al bus 890 del caso de prueba de 34 nodos de la IEEE. El estudio se desarrolla en OpenDSS y se estudia en tres escenarios, el caso base, el caso con PV y el caso con operación coordinada del PV con el BESS. La evaluación considera la magnitud y ángulo de tensión, los flujos de potencia, las pérdidas activas y el balance energético diario del almacenamiento. Los resultados muestran que el PV mejora el perfil de tensión durante las horas de mayor irradiancia, mientras que el BESS extiende el soporte a periodos de menor disponibilidad solar. En la ventana analizada de veinticuatro horas, la operación coordinada reduce la energía activa transferida desde la subestación principal y disminuye las pérdidas activas registradas. Con este enfoque, el estudio compara escenarios específicos de integración PV-BESS para cuantificar su efecto en la operación del alimentador bajo distintos perfiles horarios, lo que permite caracterizar la respuesta del sistema eléctrico de potencia ante variaciones en las condiciones de generación y demanda.**

Palabras Clave **- BESS, OpenDSS, Redes de distribución, Regulación de tensión, Sistemas fotovoltaicos.**

Abstract - The integration of distributed generation (DG) into distribution networks modifies voltage profiles, power flows, and electrical losses, with more significant impacts on radial feeders under unbalanced conditions. This paper analyzes DG integration through two resources: a photovoltaic (PV) system and a battery energy storage system (BESS), both connected to bus 890 of the IEEE 34-node test feeder. The study is conducted in OpenDSS under three scenarios: the base case, the case with PV, and the case with coordinated operation of the PV system and the BESS. The evaluation considers voltage magnitude and angle, power flows, active power losses, and the storage system's daily energy balance. The results show that the PV system improves the voltage profile during periods of higher solar irradiance, while the BESS extends voltage support to periods of lower solar availability. During the 24 hours analyzed, coordinated operation reduces the active energy transferred from the main substation and decreases the recorded active power losses. Under this approach, the study compares specific PV–BESS integration scenarios to quantify their effects on feeder operation under different hourly profiles. This comparison allows characterization of the electric power system's response to variations in generation and demand conditions.

Keywords **- BESS, Distribution networks, OpenDSS, Photovoltaic systems, Voltage regulation.**

I. INTRODUCCIÓN

La conexión de recursos distribuidos modifica el comportamiento operativo de los alimentadores eléctricos. En este contexto, los sistemas fotovoltaicos (Photovoltaic Systems, PV) y los sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías (Battery Energy Storage Systems, BESS) pueden influir en la tensión nodal, los flujos de potencia y el intercambio de potencia reactiva en la red.

En un alimentador radial, el impacto de los recursos energéticos distribuidos (Distributed Energy Resources, DER) no depende únicamente de su capacidad nominal. También intervienen el nodo de conexión, la impedancia eléctrica entre la fuente y la

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID012

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

carga, el nivel de demanda horaria y la disponibilidad del recurso primario. Por ello, el análisis del PV con el BESS debe realizarse con perfiles horarios de carga, irradiancia y temperatura, en lugar de limitarse a una condición estática de plena carga.

La capacidad de alojamiento proporciona un marco conceptual para analizar la integración de recursos distribuidos sin comprometer los límites de tensión, corriente o calidad de la energía. En este trabajo, dicho concepto se emplea como referencia para contextualizar la integración de PV y BESS en un nodo crítico, mientras que la evaluación se centra en comparar escenarios operativos específicos. En este sentido, IEEE Std 1547-2018 establece criterios de interconexión e interoperabilidad para DER, incluyendo funciones asociadas al soporte de tensión mediante potencia activa y reactiva (IEEE Standards Association, 2018).

Además del nivel de tensión, las condiciones de calidad de energía son relevantes cuando la demanda y la generación varían a lo largo del día. IEEE Std 1159-2019 considera fenómenos como variaciones de tensión y desbalance, que pueden afectar la operación de motores, transformadores y convertidores electrónicos conectados a la red. (IEEE Standards Association, 2019).

El desbalance en las redes de distribución se debe a la distribución desigual de cargas monofásicas, a la presencia de cargas trifásicas no equilibradas y a la diversidad de configuraciones de línea. Debido a esto, el comportamiento del alimentador no puede evaluarse únicamente con valores promedio de tensión, sino que requiere revisar las magnitudes por fase, especialmente en los nodos alejados de la fuente (Kersting, 2017).

La variación de tensión en un alimentador radial puede interpretarse a partir de la potencia que circula a través de la impedancia equivalente de la rama. Para una aproximación práctica, la caída de tensión depende de la resistencia, la reactancia y los flujos de potencia activa y reactiva, como se formula en (1) (Grainger & Stevenson, 2020; Kundur, 1994),

$$\Delta V \approx \frac{RP + XQ}{V} \quad , \qquad (1)$$

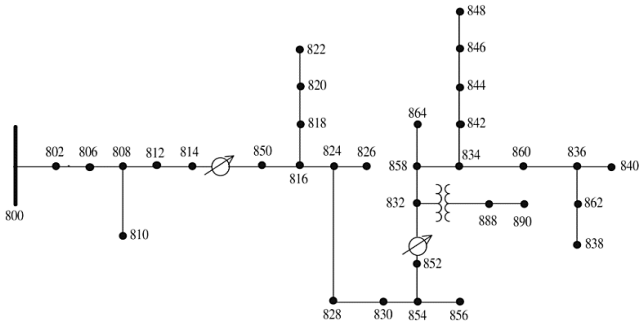
donde ΔV representa la variación de tensión, R y X son la resistencia y reactancia equivalentes de la rama, P y Q corresponden a la potencia activa y reactiva que circulan por el tramo, y V es la tensión en el punto de análisis.

La ecuación (1) permite explicar por qué la regulación de tensión no depende exclusivamente de la potencia activa. En alimentadores con alta sensibilidad al inicio de la ecuación Q, el factor de potencia de los inversores asociados al PV y al BESS puede modificar de forma importante la tensión local. Por esta razón, el estudio considera la participación de los inversores no solo como fuentes de potencia activa, sino también como elementos capaces de intercambiar potencia reactiva. (Lopes et al., 2006; Smith et al., 2011).

OpenDSS fue seleccionado porque permite representar alimentadores trifásicos desbalanceados con cargas dependientes del tiempo, reguladores, capacitores, sistemas fotovoltaicos y almacenamiento. Su enfoque, basado en la matriz de admitancias nodales y en las corrientes de inyección, facilita la simulación horaria de redes de distribución con recursos distribuidos. (Dugan & McDermott, 2011; Electric Power Research Institute [EPRI], 2020).

El sistema de prueba seleccionado es el alimentador IEEE de 34 nodos, ampliamente utilizado para validar métodos de análisis en redes de distribución. Como se muestra en la Figura 1, el sistema presenta una configuración radial, reguladores de tensión, bancos de capacitores, cargas desbalanceadas y una sección de 4.16 kV en la que se localiza el bus 890 (IEEE Power & Energy Society, s. f.).

Figura 1.
Diagrama unifilar del alimentador IEEE de 34 nodos.



En este trabajo, el bus 890 se selecciona como punto de interconexión entre el PV y el BESS debido a su sensibilidad a las caídas de tensión. La ubicación del nodo permite evaluar si la inyección local de potencia activa y el soporte reactivo de los inversores pueden mejorar el perfil de tensión en la zona más crítica del alimentador. La simulación se realiza en estado estacionario mediante perfiles horarios de carga, de irradiancia y de temperatura. Los datos de irradiancia y temperatura se incorporan al modelo de PV mediante perfiles externos, que pueden generarse a partir de bases climáticas, como NASA POWER, para representar la variabilidad solar y térmica del sitio de estudio (NASA POWER Project, 2020).

El análisis se ejecuta en OpenDSS en operación estacionaria con ControlMode=STATIC, de modo que los elementos de regulación del alimentador actúan durante la solución horaria. A diferencia de ControlMode=OFF, en la que los controles se deshabilitan, esta configuración permite representar una operación regulada del sistema. El PV se modela mediante el elemento PVSystem, que incorpora perfiles de irradiancia y temperatura, eficiencia del inversor y operación con un factor de potencia de 0.95. El BESS se representa mediante el elemento Storage, con un perfil de carga y descarga programado a complementar la operación del PV en el bus 890. Los escenarios evaluados se resumen en la Tabla 1: el Caso 1 corresponde al alimentador base sin GD, el Caso 2 integra el PV en el bus 890 y el Caso 3 considera la operación coordinada del PV con el BESS.

El objetivo es verificar si esta estrategia mantiene el bus crítico dentro de la banda operativa de $0.95 \leq V \leq 1.05$, utilizando perfiles horarios estructurados para simulaciones anuales y una ventana representativa de 24 horas para el análisis detallado.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID012

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Tabla 1.
Escenarios evaluados en el estudio

Caso	Descripción	Elementos activos
Caso 1	Caso base (Sin GD)	Solo cargas, reguladores, capacitores
Caso 2	Con generación fotovoltaica	Cargas + PV (300 kW) en nodo 890
Caso 3	Con generación fotovoltaica y BESS	Cargas + PV (300 kW) + BESS (2.5 MWh) en nodo 890

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

En esta sección se describe el modelo eléctrico empleado para evaluar la integración del sistema fotovoltaico y del sistema de almacenamiento en el alimentador IEEE de 34 nodos. El análisis se desarrolla en OpenDSS mediante simulaciones horarias en estado estacionario, considerando cargas desbalanceadas, perfiles de demanda, irradiancia, temperatura y operación programada del BESS. El desarrollo técnico se organiza en siete partes: descripción del sistema base, representación del desbalance, uso de OpenDSS, método de solución, modelado del PV, modelado del BESS y definición del caso de estudio. Esta estructura permite separar el modelo eléctrico, los recursos distribuidos y las condiciones de simulación.

2.1 Sistema eléctrico base

El sistema de prueba corresponde al alimentador IEEE de 34 nodos, utilizado con frecuencia para estudiar redes radiales con condiciones desbalanceadas. La red opera en 24.9 kV y cuenta con una sección secundaria de 4.16 kV alimentada por un transformador de distribución. La fuente equivalente se ubica en el nivel de 69 kV, mientras que el transformador XFM1 suministra la zona en la que se localizan los buses 888 y 890.

La Figura 1 muestra que el bus 890 se ubica en el extremo de la sección de 4.16 kV. Esta posición incrementa su sensibilidad ante caídas de tensión y lo convierte en un punto adecuado para evaluar la interconexión entre el PV y el BESS. El alimentador incluye reguladores, capacitores y cargas de distintas configuraciones, lo que permite analizar el desempeño de los recursos distribuidos en una red con características operativas realistas.

2.2 Sistema desbalanceado

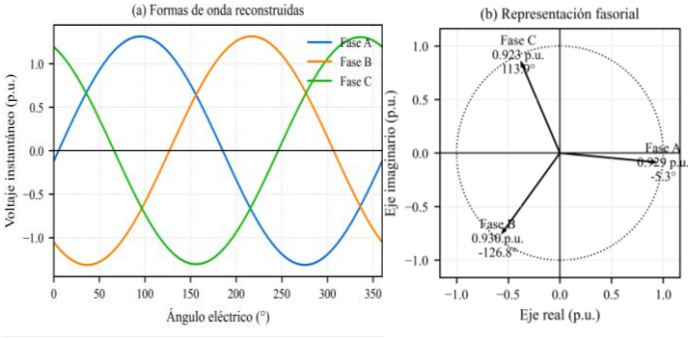
El alimentador opera en condiciones desbalanceadas porque las cargas no se distribuyen de manera uniforme entre las fases. También influyen las conexiones en estrella y delta, las ramas monofásicas y las distintas configuraciones de línea. Por esta razón, el análisis debe realizarse fase por fase, ya que el menor voltaje puede presentarse en distintas fases y horarios. El índice de desbalance se calcula mediante la relación entre las componentes de secuencia negativa y positiva, como se indica en (2),

$$\%Desbalance = \frac{V_{neg}}{V_{pos}} x\ 100\%\,, \qquad (2)$$

donde V_{neg} y V_{pos} representan las magnitudes de las componentes de secuencia negativa y positiva, respectivamente.

La norma IEEE Std 1159-2019 establece que el desbalance debe mantenerse dentro de niveles aceptables para evitar efectos adversos en equipos como motores, transformadores y convertidores electrónicos. En la Figura 2 se ilustra una condición representativa del bus 890, en la que las formas de onda y el diagrama fasorial evidencian diferencias entre fases.

Figura 2.
Sistema trifásico desbalanceado en bus 890, hora 0.



2.3 Software de simulación OpenDSS

El alimentador se modeló en OpenDSS porque esta herramienta permite resolver flujos de potencia en redes trifásicas desbalanceadas con elementos de control y recursos distribuidos. En el caso de estudio se utilizaron perfiles horarios de la demanda, la irradiancia, la temperatura y la operación del BESS. Las cargas se representaron mediante objetos LoadShape, asignando multiplicadores horarios independientes para la potencia activa y la reactiva. De esta manera, fue posible reproducir variaciones de la demanda residencial, industrial, comercial y mixta durante el día simulado. Los perfiles del PV y del BESS se incorporaron mediante archivos externos. En particular, el archivo de recursos distribuidos contiene la irradiancia normalizada, la temperatura ambiente y el multiplicador ESS_{mult}. Cada hora se resolvió como una condición estacionaria independiente, con sus propios valores de carga, de recurso solar y de despacho del almacenamiento.

2.4 Método de solución empleado por OpenDSS

El proceso de solución en OpenDSS se basa en una formulación nodal del sistema eléctrico. En cada iteración se actualizan las corrientes equivalentes de los elementos conectados y se resuelve la relación entre las inyecciones de corriente y las tensiones nodales, como se expresa en (3),

$$I_{iny}(V) = Y_{bus}.V, \qquad (3)$$

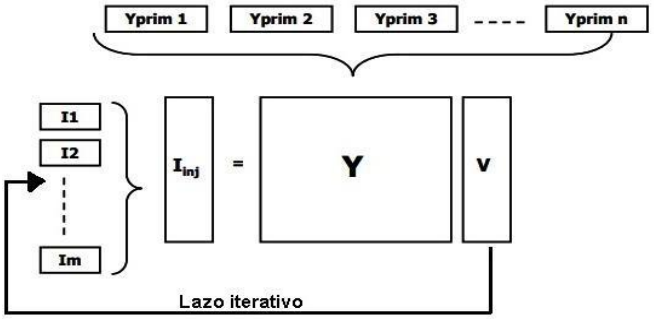
donde Y_{bus} es la matriz de admitancia nodal, V corresponde al vector de tensiones nodales y $I_{iny}(V)$ representa el vector de corrientes de inyección de los elementos conectados al sistema.

Las cargas, el PV y el BESS se incorporan al sistema mediante modelos equivalentes que ajustan sus corrientes de inyección en función de la tensión y las condiciones horarias. El procedimiento continúa hasta que se cumpla el criterio de convergencia de las tensiones nodales. La Figura 3 resume el esquema iterativo utilizado para la solución del flujo de potencia.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID012

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 3.
Procedimiento de solución utilizado por OpenDSS.



2.5 Modelado del sistema fotovoltaico

El sistema fotovoltaico se representó mediante el elemento PVSystem de OpenDSS. En el modelo propuesto, el PV se conecta al bus 890, dentro de la sección de 4.16 kV, mediante una configuración trifásica en delta.

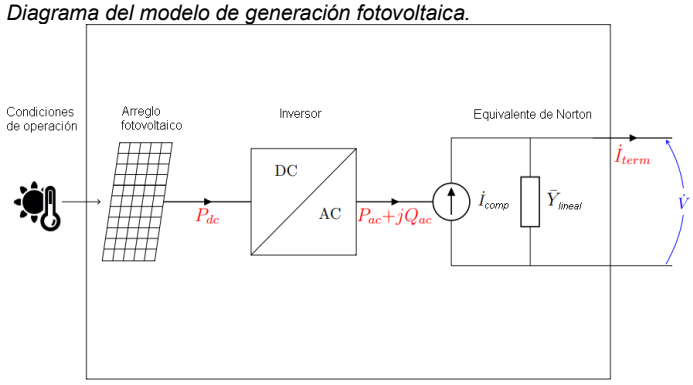
La potencia activa entregada por el PV varía en función de la capacidad máxima del arreglo, la irradiancia normalizada, la temperatura y la eficiencia del inversor. Esta dependencia se representa mediante (4), en la que se combinan las condiciones ambientales con el comportamiento del convertidor.

$$P_{PV}(t) = P_{mpp} G_{pu}(t) f_T\big(T(t)\big) \eta_{inv}(t), \qquad (4)$$

donde P_{mpp} es la potencia máxima del arreglo, $G_{pu}(t)$ es la irradiancia normalizada, $f_T\big(T(t)\big)$ es el factor de corrección por temperatura y $\eta_{inv}(t)$, es la eficiencia del inversor.

El modelo general del sistema fotovoltaico se representa en la Figura 4, donde se ilustran las etapas de conversión de energía y la equivalencia de Norton empleada en el análisis eléctrico.

Figura 4.
Diagrama del modelo de generación fotovoltaica.



El modelo considera una curva de eficiencia del inversor y una curva de corrección por temperatura. Estas curvas permiten que la potencia generada varíe según las condiciones ambientales del perfil horario. Los parámetros eléctricos y operativos del PV se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2.
Parámetros del sistema fotovoltaico en OpenDSS.

Parámetro	Valor
Nombre	PV_890
Tecnología	Silicio policristalino
Pmpp	300 kW
kVA	375 kVA
Factor de potencia	0.95
Voltaje nominal	4.16 kV
Conexión	Delta,Trifásica
Eficiencia del inversor	0.96
Nodo de conexión	890
Modelo de irradiancia	Arizona (TMY3)
Modelo de temperatura	Ambiente (Arizona)

2.6 Modelado del sistema BESS

El sistema de almacenamiento se implementó mediante el elemento Storage de OpenDSS. El BESS se conectó al bus 890, en la misma sección de 4.16 kV que el sistema fotovoltaico. Su operación se definió mediante DispMode=Follow, por lo que la potencia activa sigue un perfil horario predefinido. En este modo, valores positivos del perfil representan descarga y valores negativos, carga, escalados con respecto a la potencia nominal kWrated del elemento Storage (Electric Power Research Institute [EPRI], 2024a, 2024b). Los parámetros eléctricos y operativos del BESS se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3.
Parámetros del sistema de almacenamiento en OpenDSS.

Parámetro	Valor
Nombre	ESS_890
Tecnología	Ion-Litio
kWrated (Potencia activa)	300 kW
kVA (Potencia aparente)	375 kVA
kWh (Capacidad de energía)	2500 kWh
SOC inicial	0.88
SOC mínimo	0.2
SOC máximo	1
Eficiencia de carga	0.95
Eficiencia de descarga	0.95
Voltaje nominal	4.16 kV
Conexión	Delta, Trifásica
Modo de despacho	Follow (Perfil horario)

La capacidad del BESS se definió con una relación energía/potencia de 8.33 h (2500 kWh/300 kW). Esta relación se utiliza como condición técnica de referencia para mantener la reserva energética durante la ventana de 24 horas y evaluar el efecto del desplazamiento de energía sobre la tensión y las pérdidas. Aunque los sistemas comerciales suelen dimensionarse con duraciones de 1–4 h, estudios recientes sobre almacenamiento de larga duración en redes de distribución han empleado valores superiores como escenarios de referencia para evaluar el desplazamiento energético y el soporte de tensión (Adelmann & Graeber, 2025; Dalvi et al., 2026; Hatziargyriou et al., 2025). La potencia activa del BESS se calcula como se muestra en (5),

$$P_{ESST}(t) = ESS_{mult}(t).P_{rated}\,, \qquad (5)$$

donde P_{rated} es la potencia nominal activa del BESS. Si $ESS_{mult}(t) > 0$, el BESS descarga e inyecta potencia;

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

$ESS_{mult}(t) < 0$, el BESS carga y absorbe potencia; si $ESS_{mult}(t) = 0$ permanece en reposo.

El balance energético se calculó considerando las eficiencias de carga y de descarga. La energía descargada del lado de corriente alterna se define (6) como,

$$E_{dis,AC} = \sum_{ESS_{mult}>0} ESS_{mult}(t).P_{rated}\Delta t. \quad (6)$$

La energía absorbida durante la carga se obtiene según (7),

$$E_{ch,AC} = -\sum_{ESS_{mult}<0} ESS_{mult}(t).P_{rated}\Delta t. \quad (7)$$

El cambio diario de energía interna del BESS se calcula mediante (8)

$$\Delta E_{BESS} = E_{ch,AC}\eta_{ch} - \frac{E_{dis,AC}}{\eta_{dis}}, \quad (8)$$

donde η_{ch} y η_{dis} son las eficiencias de carga y descarga. Esta expresión permite verificar si el perfil horario del BESS mantiene el balance energético durante el periodo evaluado.

2.7 Descripción del sistema eléctrico analizado

El caso de estudio se definió a partir de los escenarios presentados en la Tabla 1. El Caso 1 corresponde al alimentador base sin generación distribuida; el Caso 2 incorpora el PV en el bus 890; y el Caso 3 evalúa la operación coordinada del PV con el BESS en el mismo punto de interconexión.

Las simulaciones se realizaron con perfiles horarios de carga activa y reactiva para distintas categorías de demanda: residencial, industrial, comercial y mixta. Estos perfiles permiten representar la variación temporal de la demanda y su efecto sobre el perfil de tensión del alimentador.

El bus 890 fue seleccionado como punto de integración debido a su ubicación en la sección de 4.16 kV y a su sensibilidad ante caídas de tensión. En este nodo se conectaron el sistema fotovoltaico y el BESS para evaluar su capacidad de mitigación bajo condiciones horarias de operación.

Los perfiles asociados a los recursos distribuidos se muestran en la Figura 5 para una ventana representativa de 24 horas. La Figura 5(a) presenta la irradiancia normalizada utilizada por el modelo fotovoltaico, la Figura 5(b) muestra la temperatura ambiente, y la Figura 5(c) describe el perfil de carga y descarga del BESS mediante el multiplicador ESS_{mult}.

La Figura 6 muestra la integración del PV y del BESS en el alimentador y destaca su conexión al bus 890. Esta representación permite relacionar la ubicación física de los recursos distribuidos con los resultados de tensión, flujo de potencia y pérdidas que se presentan posteriormente.

Figura 5.
Perfiles horarios de recursos distribuidos para una ventana representativa de 24 horas: (a) irradiancia normalizada, (b) temperatura ambiente y (c) multiplicador de operación del BESS.

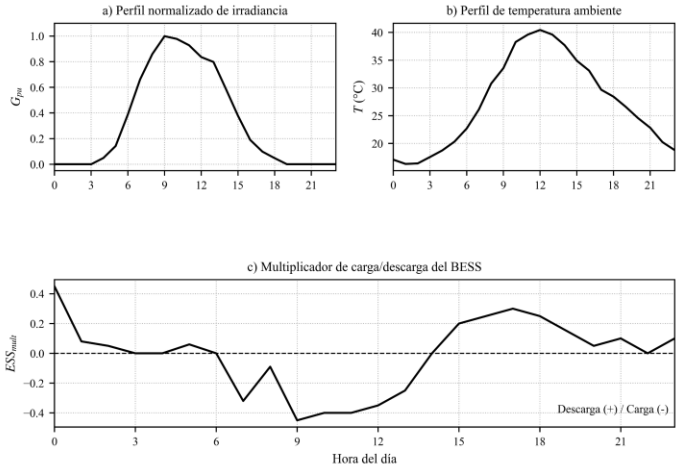
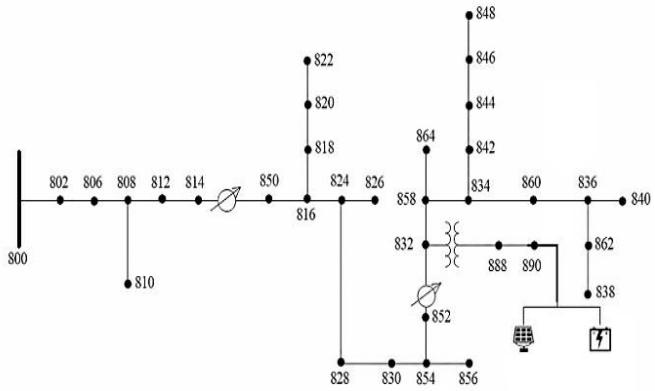


Figura 6.
Integración del sistema fotovoltaico y del BESS en el bus 890 del alimentador IEEE de 34 nodos.



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Perfil nodal de tensión en condición seleccionada

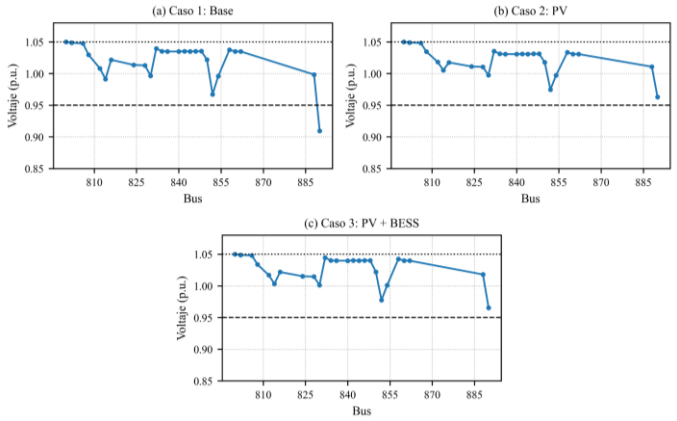
La Figura 7 compara los perfiles nodales de tensión para la hora 8 y la fase 3. Esta condición se empleó como referencia común para observar el efecto de los recursos distribuidos bajo el mismo estado de carga. En el caso base (Figura 7(a)), la tensión disminuye a medida que se avanza hacia la zona final del alimentador. El bus 890 se ubica por debajo de 0.95 p.u., lo que confirma su condición crítica en la sección de 4.16 kV.

Al incorporar el PV (Figura 7(b)), el perfil mejora en la zona cercana al punto de conexión. Sin embargo, el valor del bus 890 permanece cerca del límite mínimo, por lo que la generación fotovoltaica, por sí sola, no ofrece suficiente margen operativo para esta condición.En el caso de PV y BESS (Figura 7(c)), el extremo del alimentador alcanza valores superiores a 0.95 p.u. Esto muestra que el almacenamiento complementa al PV y contribuye a reducir la caída acumulada en los nodos finales.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID012

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

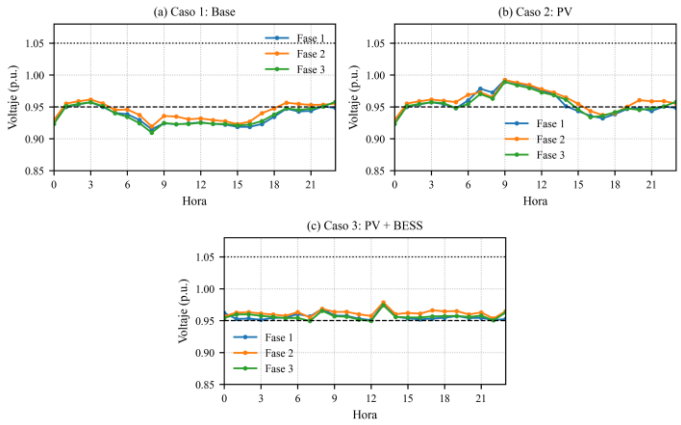
Figura 7.
Perfil nodal de tensión para la hora 8 y fase 3: (a) caso 1, (b) caso 2 y (c) caso 3.



3.2 Evolución horaria de tensión en el bus 890

La Figura 8 muestra la evolución de la tensión en las tres fases del bus 890 durante una ventana de 24 horas. Esta comparación permite identificar las horas en las que el nodo crítico se aproxima al límite de 0.95 p.u. o cae por debajo de él. En el caso base (Figura 8(a)), durante varias horas se registran tensiones inferiores al límite operativo. La condición más severa se presenta durante el intervalo de mayor demanda, con valores cercanos a 0.91–0.93 p.u. Con el PV (Figura 8(b)), la tensión aumenta durante las horas de irradiancia, especialmente entre las 7 y las 14. No obstante, cuando la contribución fotovoltaica disminuye, algunas fases vuelven a ubicarse cerca del límite inferior. En el escenario con PV y BESS (Figura 8(c)), las tres fases presentan un comportamiento más estable dentro de la banda operativa. Esto indica que el almacenamiento extiende el soporte de tensión a periodos en los que el PV no aporta suficiente potencia.

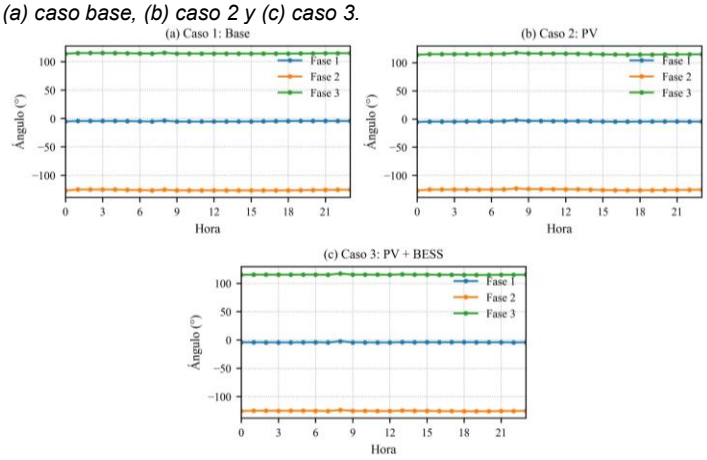
Figura 8.
Evolución horaria de tensión en el bus 890 para las tres fases: (a) caso base, (b) caso con PV y (c) caso con PV y BESS.



3.3 Evolución angular en el bus 890

La Figura 9 muestra la evolución horaria de los ángulos de tensión en el bus 890. En los tres escenarios se conserva la separación angular característica del sistema trifásico, con una fase cercana a 0°, otra alrededor de −120° y otra cercana a +120°. La incorporación del PV y del BESS modifica principalmente la magnitud de la tensión, mientras que los ángulos presentan variaciones moderadas. Este comportamiento indica que la mejora del perfil de tensión no se obtiene a costa de una alteración significativa de la referencia angular local. El análisis angular es útil porque el alimentador opera bajo condiciones desbalanceadas. Por ello, verificar solo las magnitudes no es suficiente; también se debe comprobar que la incorporación de los recursos no introduzca desplazamientos angulares abruptos en el bus crítico.

Figura 9.
Evolución horaria del ángulo de tensión en el bus 890 para las tres fases: (a) caso base, (b) caso 2 y (c) caso 3.



3.4 Flujos de potencia y pérdidas en la sección monitoreada

La Figura 10 compara los flujos de potencia activa en el transformador XFM1, la línea L32 y las pérdidas activas de la sección monitoreada. Estos elementos son relevantes porque conectan la zona de 4.16 kV donde se ubica el bus 890. En el caso base, la potencia transferida por XFM1 y L32 aumenta durante las horas de mayor demanda. Esta condición coincide con los periodos de menor tensión observados en el bus 890, lo que confirma la relación entre flujo de potencia, caída de tensión y pérdidas. Con el PV, la potencia activa suministrada desde aguas arriba disminuye durante las horas solares. Este comportamiento se observa especialmente entre las horas 7 y 14, donde la generación local reduce la potencia requerida desde la sección previa del alimentador. En el caso con PV y BESS, la potencia activa presenta una redistribución más marcada. El BESS absorbe energía durante parte del periodo solar y posteriormente inyecta potencia en horas de menor irradiancia, reduciendo la exigencia del alimentador en otros intervalos. La Figura 10(c) muestra que las pérdidas activas disminuyen respecto al caso base durante la mayor parte del día. Aunque el perfil con BESS presenta variaciones asociadas a la carga y descarga, el nivel de pérdidas se mantiene por debajo del caso base en los intervalos críticos.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID012

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 10.
Flujos de potencia y pérdidas en la sección monitoreada: (a) potencia activa en XFM1, (b) potencia activa en L32 y (c) pérdidas activas monitoreadas.

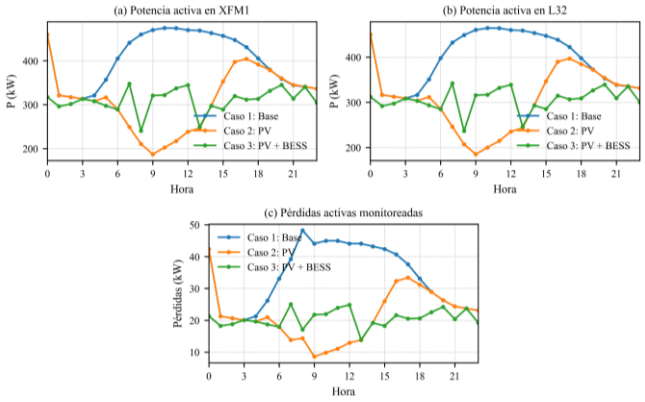
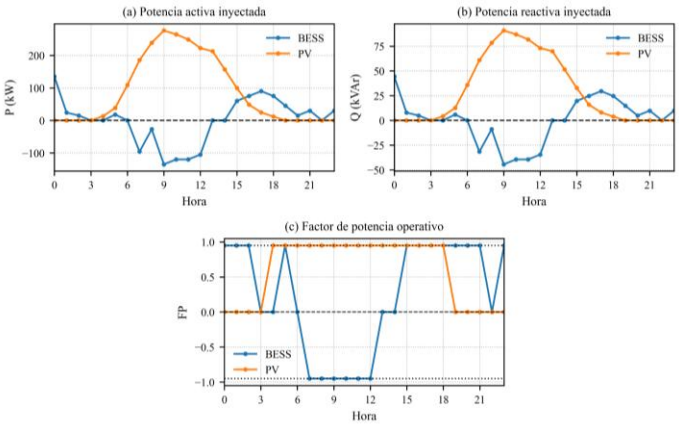


Figura 11.
Seguimiento horario de potencia del PV y BESS: (a) potencia activa inyectada, (b) potencia reactiva inyectada y (c) factor de potencia operativo.



3.5 Seguimiento de potencia del PV y BESS

La Figura 11 permite verificar directamente la operación de los recursos conectados en el bus 890. En esta figura, la potencia positiva representa inyección hacia la red, mientras que la potencia negativa representa absorción desde el alimentador. En la Figura 11(a), el PV inyecta potencia activa durante el intervalo con irradiancia disponible. Su potencia aumenta gradualmente durante la mañana, alcanza su máximo alrededor de las horas centrales del día y disminuye hacia la tarde. El BESS opera de forma complementaria. Durante las primeras horas y al final del día inyecta potencia activa, mientras que en el intervalo solar absorbe potencia para cargarse. Este comportamiento coincide con el propósito del perfil ESS_{mult}: desplazar energía desde las horas con disponibilidad fotovoltaica hacia periodos de menor irradiancia. La Figura 11(b) muestra que tanto el PV como el BESS intercambian potencia reactiva debido a la operación con factor de potencia de 0.95. Este resultado es importante porque la mejora de tensión no depende únicamente de P, sino también del soporte de Q proporcionado por los inversores. En la Figura 11(c), el factor de potencia del PV se mantiene cercano a 0.95 durante el periodo de generación. En el BESS, el signo del factor de potencia cambia durante la carga, ya que el almacenamiento absorbe potencia activa desde la red, comportándose temporalmente como una carga controlada.

La penetración local del PV se calculó con base en la potencia activa, considerando que el recurso fotovoltaico se dimensionó con una capacidad de 300 kW y que la demanda activa nominal del bus 890 corresponde a 450 kW. La relación entre estas potencias permite estimar un nivel de penetración equivalente a 66.7 %. La capacidad aparente del inversor, igual a 375 kVA, se emplea para habilitar la operación con factor de potencia de 0.95 y el intercambio de potencia reactiva. El BESS también posee una potencia activa nominal de 300 kW; sin embargo, se interpreta como recurso de desplazamiento energético y soporte operativo, ya que su potencia de salida depende de la energía previamente almacenada y del perfil horario asignado.

3.6 Balance energético del BESS

La Tabla 4 muestra el balance energético del BESS evaluado a partir del perfil horario de operación. Esta revisión es necesaria porque el almacenamiento no debe actuar como una fuente ideal e ilimitada, sino como un recurso con energía finita y restricciones de eficiencia.

Tabla 4.
Balance energético diario del BESS.

Métrica	Valor	Unidad
Suma positiva de ESS_{mult}	2.04	pu-h
Suma negativa absoluta de ESS_{mult}	2.26	pu-h
Energía AC descargada	612	kWh
Energía AC absorbida durante carga	678	kWh
Energía extraída del BESS	644.21	kWh
Energía almacenada en el BESS	644.1	kWh
Cambio diario de energía interna ΔE_{BESS}	-0.11	kWh/día
Cambio equivalente de SOC	-0.0044	%/día

La energía AC descargada corresponde a los valores positivos de ESS_{mult}, mientras que la energía absorbida durante la carga se obtiene de los valores negativos del perfil. Al considerar eficiencias de carga y descarga del 95 %, el cambio diario de energía interna es aproximadamente -0.11 kWh/día.

El balance cercano a cero de ΔE_{BESS} se debe a que ESS_{mult} fue definido como un perfil horario de referencia con cierre energético diario. Esta condición permite comparar el efecto del BESS sobre la red sin introducir una deriva acumulativa del estado de carga durante la ventana evaluada.

3.7 Discusión del alcance del estudio

Los resultados muestran que el PV mejora el perfil de tensión durante las horas de mayor irradiancia, mientras que el sistema de almacenamiento en baterías extiende el soporte hacia periodos de menor disponibilidad solar. La operación coordinada permite mantener el bus 890 dentro de la banda operativa y reducir la transferencia de potencia desde aguas arriba.

La mejora observada se explica por tres mecanismos complementarios: la inyección local de potencia activa, el intercambio de potencia reactiva mediante los inversores y el desplazamiento energético del almacenamiento. El desempeño obtenido depende del punto de conexión, de la impedancia de la

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID012

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

sección de 4.16 kV y de los perfiles horarios de carga, irradiancia y despacho del almacenamiento.
La penetración local del PV corresponde al 66.7 % de la carga activa nominal del bus 890, lo que representa un nivel elevado a escala del nodo de interconexión. Este valor se interpreta únicamente como referencia local y no como la penetración global del alimentador. En estudios de capacidad de alojamiento, la penetración se evalúa mediante barridos progresivos respecto a la carga del alimentador, alcanzando niveles que pueden llegar al 100 % o más de la carga pico.
En relación con el almacenamiento, la capacidad de 2.5 MWh y la potencia nominal de 300 kW proporcionan una duración de 8.33 h, superior a la de aplicaciones de corta duración. En este trabajo se considera como condición técnica de referencia para evaluar el desplazamiento energético y soporte de tensión en una ventana diaria. La selección óptima de potencia y energía dependería de criterios económicos, ciclos de operación, límites de SOC y requerimientos específicos de la red.
El concepto de capacidad de alojamiento se utiliza como marco para contextualizar la integración de recursos distribuidos. Sin embargo, el análisis se orienta a comparar escenarios específicos de integración PV-BESS en el bus 890 y a cuantificar su efecto sobre la operación del alimentador, sin constituir una estimación formal de la capacidad máxima de alojamiento.

IV. CONCLUSIONES

Durante el perfil de 24 horas, la energía activa transferida por XFM1 fue de 9716.65 kWh en el caso base, 7483.26 kWh en el caso con PV y 7451.34 kWh en el caso con PV y BESS. Esto representa reducciones de 22.99 % y 23.31 %, respectivamente, lo que confirma que la integración de recursos distribuidos disminuyó la potencia requerida desde la red aguas arriba.
En la línea L32, la energía activa transferida pasó de 9531.06 kWh en el caso base a 7366.25 kWh con PV y 7339.39 kWh con PV y BESS. Estas variaciones equivalen a reducciones de 22.71 % y 23.00 %, respectivamente, mostrando que el soporte local en el bus 890 también redujo el flujo de potencia en la sección directamente asociada al nodo crítico.
Las pérdidas activas de energía calculadas fueron de 817.92 kWh en el caso base, 515.75 kWh con PV y 493.40 kWh con PV y BESS. Por tanto, las pérdidas disminuyeron en 36.94 % con la integración del PV y en 39.68 % con la operación coordinada del PV y el BESS. Esta reducción se relaciona con la menor circulación de corriente desde la subestación del alimentador y con el intercambio local de potencia activa y reactiva.
La potencia nominal del PV fue de 300 kW, equivalente al 66.7% de la carga activa nominal del bus 890, considerada de 450 kW. Esta relación se interpreta como penetración local del recurso fotovoltaico respecto a la demanda activa del nodo crítico. Por su parte, el BESS se dimensionó con 300 kW de potencia activa y 2.5 MWh de capacidad energética, por lo que su contribución corresponde a soporte operativo y desplazamiento energético dentro de la ventana diaria analizada.
El seguimiento de potencia activa y reactiva confirmó que ambos recursos participaron en la regulación del bus crítico. La operación con factor de potencia de 0.95 permitió que los inversores intercambiaran potencia reactiva, contribuyendo a la mejora del perfil de tensión junto con la inyección local de potencia activa.
El balance energético diario del BESS presentó un cambio aproximado de −0.11 kWh/día, equivalente a -0.0044% de su capacidad nominal. Este resultado indica que el perfil de carga y descarga conserva prácticamente el cierre energético diario, lo que permite evaluar el efecto del almacenamiento sin introducir una deriva acumulativa durante la ventana de 24 horas.
En conjunto, los resultados muestran que la operación coordinada del PV y el BESS es una alternativa viable para mitigar caídas de tensión en el bus 890 y reducir los flujos de potencia desde aguas arriba. Bajo el alcance definido, el estudio compara escenarios específicos de integración PV-BESS y cuantifica su efecto sobre la tensión, los flujos de potencia y las pérdidas del alimentador.

V. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo de SECIHTI mediante el programa de becas, así como las facilidades proporcionadas por el Instituto Tecnológico de La Laguna y su División de Estudios de Posgrado e Investigación.

VI. REFERENCIAS

Adelmann, F., & Graeber, D. (2025). Beyond seasonal arbitrage—Structured review on distributed long duration energy storage and its benefits to the distribution grid. *Energies, 18*(6256), 1–25. https://www.energiewirtschaft.org/wp-content/uploads/2026/02/energies-18-06256.pdf

Bollen, M. H. J., & Hassan, F. (2011). *Integration of distributed generation in the power system*. Wiley-IEEE Press. https://doi.org/10.1002/9781118029029

Dalvi, P., Chen, Y., & National Laboratory of the Rockies. (2026). *A comprehensive comparison of methods for evaluating dispatch of long-duration energy storage in power systems models*. U.S. Department of Energy. https://docs.nlr.gov/docs/fy26osti/92597.pdf

Dugan, R. C., & McDermott, T. E. (2011). An open source platform for collaborating on smart grid research. *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. IEEE. https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039829

Electric Power Research Institute. (2020). *OpenDSS documentation*. https://opendss.epri.com

Electric Power Research Institute. (2024a). *Follow. OpenDSS documentation*. https://opendss.epri.com/Follow.html

Electric Power Research Institute. (2024b). *kWRated. OpenDSS documentation*. https://opendss.epri.com/kWRated.html

Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (2020). *Power system analysis* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.

Hatziargyriou, N., Joos, G., & Schwaegerl, C. (2025). Operation of battery energy storage systems in distribution networks. In C. Schwaegerl, K. Dedekind, & R. Brown (Eds.), *Distributed energy resources in active distribution networks* (CIGRE Green Books). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87693-7_27-1

IEEE Power & Energy Society. (s. f.). *IEEE PES test feeders*. https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

IEEE Standards Association. (2018). *IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces* (IEEE Std 1547-2018). IEEE. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8332112

IEEE Standards Association. (2019). *IEEE recommended practice for monitoring electric power quality* (IEEE Std 1159-2019). IEEE. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8796486

Kersting, W. H. (2017). *Distribution system modeling and analysis* (4th ed.). CRC Press.

Kundur, P. (1994). *Power system stability and control*. McGraw-Hill Education.

Lopes, J. A. P., Moreira, C. L., & Madureira, A. G. (2006). Defining control strategies for microgrids islanded operation. *IEEE Transactions on Power Systems, 21*(2), 916–924. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.873018

NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) Project. (2020). *NASA POWER data access viewer*. NASA. https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/

Smith, J. W., Dugan, R. C., & Sunderman, W. (2011). Distribution modeling and analysis of high penetration PV. *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. IEEE. https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039765

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización	María Montserrat Martínez Alvarez, Concepción Hernández Flores, Marco Antonio Arjona López
2	Curación de datos	María Montserrat Martínez Alvarez, Rubén Ángel Muñoz Castillo
3	Análisis formal	María Montserrat Martínez Alvarez, Concepción Hernández Flores, Marco Antonio Arjona López
4	Obtención de fondos	Concepción Hernández Flores, Marco Antonio Arjona López
5	Investigación	María Montserrat Martínez Alvarez
6	Metodología	María Montserrat Martínez Alvarez
7	Administración del proyecto	Concepción Hernández Flores, Marco Antonio Arjona López
8	Recursos	Concepción Hernández Flores, Marco Antonio Arjona López
9	Software	María Montserrat Martínez Alvarez, Rubén Ángel Muñoz Castillo
10	Supervisión	Concepción Hernández Flores, Marco Antonio Arjona López
11	Validación	María Montserrat Martínez Alvarez, Concepción Hernández Flores, Marco Antonio Arjona López
12	Visualización	María Montserrat Martínez Alvarez
13	Redacción - borrador original	María Montserrat Martínez Alvarez
14	Redacción - revisión y edición	María Montserrat Martínez Alvarez, Concepción Hernández Flores, Marco Antonio Arjona López

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID012

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Plan de Negocios para Industrializar Trucha Arcoíris en la Región de Valle de Bravo

Business Plan for the Industrial-Scale Production of Rainbow Trout in the Valle de Bravo Region

González-Flores, A.[1]; Hernández-Sánchez, J.[2]; Santos-García, A.[3]

Datos de Adscripción:

[1] González Flores, Adalberto
Tecnológico Nacional de México/TES-Valle de Bravo. División de Licenciatura en Administración.
ROR ID: https://ror.org/02zv2b697
adalberto.gf@vbravo.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8045-295X

[2] Hernández Sánchez, Josefina
Tecnológico Nacional de México/TES-Valle de Bravo. División de Licenciatura en Administración.
ROR ID: https://ror.org/02zv2b697
josefina.hs@vbravo.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4771-5099

[3] Santos García, Adrián
Tecnológico Nacional de México/TES-Valle de Bravo.
División de Licenciatura en Administración.
ROR ID: https://ror.org/02zv2b697
adrian.sg@vbravo.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8144-8346

Resumen **- La limitada diversificación de productos derivados de la trucha arcoíris en la región de Valle de Bravo restringe el aprovechamiento de su potencial productivo y el fortalecimiento económico de las unidades trutícolas, lo que plantea la necesidad de evaluar alternativas con valor agregado y factibilidad integral. En este contexto, el estudio analizó la viabilidad de desarrollar un alimento semi-industrializado a base de trucha, considerando su aceptación en el mercado, así como las condiciones técnicas, administrativas y financieras para su implementación. Bajo un enfoque metodológico mixto, se integraron herramientas cuantitativas y cualitativas para evaluar la demanda, la segmentación de mercado, la aceptación del producto y la disposición a pagar, complementadas con el diseño del proceso técnico-administrativo mediante pruebas piloto, el desarrollo de prototipos y la planeación operativa. De manera paralela, se realizó un análisis financiero basado en proyecciones de ingresos, costos y rentabilidad. Los hallazgos evidencian una aceptación favorable de los productos, destacando la trucha en aceite, en vinagreta y en ensalada, con precios óptimos de $70.00, $60.00 y $55.00 por porción de 125 gramos en masa drenada. Asimismo, se identificó un punto de equilibrio alcanzable y se obtuvieron indicadores financieros positivos, con un rendimiento estimado del 30%. En conjunto, estos resultados confirman la viabilidad del proyecto y su potencial para generar impactos económicos y sociales positivos al promover la diversificación productiva, el fortalecimiento de la cadena acuícola y el acceso a alimentos nutritivos de alto valor agregado.**

Palabras Clave **- Estudio de mercado, factibilidad económica, granja trutícola, modelo de negocio,**

Abstract **- The limited diversification of rainbow trout-derived products in the Valle de Bravo region restricts the utilization of its productive potential and the economic strengthening of trout farms, highlighting the need to evaluate value-added alternatives with comprehensive feasibility. In this context, the study analyzed the viability of developing a semi-industrialized trout-based food product, considering market acceptance and the technical, administrative, and financial conditions for implementation. Using a mixed-methods approach, the study integrated quantitative and qualitative tools to assess demand, market segmentation, product acceptance, and willingness to pay. The team complemented this by designing the technical-administrative process through pilot tests, prototype development, and operational planning. Simultaneously, the team conducted a financial analysis based on projections of income, costs, and profitability. The findings show favorable product acceptance, particularly for trout in oil, vinaigrette, and salad, with optimal prices of $70.00, $60.00, and $55.00 per 125-gram drained-weight portion, respectively. The study also identified an achievable break-even point and positive financial indicators, with an estimated return of 30%. Taken together, these results confirm the project's viability and its potential to generate positive economic and social impacts by promoting productive diversification, strengthening the aquaculture value chain, and providing access to nutritious, high value-added foods.**

Keywords **- Business model, economic feasibility, fish farming, market research, trout farm.**

I. INTRODUCCIÓN

A nivel nacional, la Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca reportó que en 2023 México produjo más de 1.9 millones de toneladas de especies pesqueras y acuícolas, con un valor económico superior a 42 mil 100 millones de pesos, lo que evidencia la importancia económica del sector y el potencial para desarrollar cadenas de suministro con mayor articulación industrial (Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca, 2024). En paralelo, el marco jurídico vigente refuerza la necesidad de orientar la actividad hacia el aprovechamiento sustentable y el desarrollo integral del sector; la Ley General de Pesca y Acuacultura Sustentables, con reforma publicada en 2024, establece bases para ordenar, fomentar y administrar el

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID016

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

aprovechamiento pesquero-acuícola bajo principios de sustentabilidad y participación de actores productivos (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2024). Para Sepúlveda et al. (2021) las capacidades y recursos organizacionales que presentan las unidades de producción trutícolas, frente a la innovación inclusiva, muestran como reto principal que los productores logren internalizar y socializar conocimientos a partir del valor que ellos les otorguen para la resolución de problemas técnicos, económicos, financieros y de mercado; esto no se limita a los conocimientos útiles para los problemas cotidianos de la producción de subsistencia, sino que incluye aquéllos que sirven para intervenir y controlar los procesos de innovación, sin perder de vista el sentido, significaciones y valoraciones de la vida de las personas que desarrollan la actividad, puesto que la innovación inclusiva pone al centro a las personas. Desde el punto de vista alimentario, la tendencia de consumo en México apunta a productos de conveniencia y opciones saludables, lo que ha impulsado el mercado de alimentos preparados y acelerado la innovación en propuestas listas para consumir o de rápida preparación (The Food Tech, 2024). Para González, et al. (2024), esta tendencia es especialmente relevante para productos de origen acuícola, donde la aceptación puede incrementarse si se ofrecen presentaciones prácticas, inocuas y con atributos nutricionales reconocibles. En este contexto, la presente investigación plantea el diseño y evaluación de un proyecto para elaborar alimentos semi-industrializados a base de trucha arcoíris de granjas trutícolas de la región de Valle de Bravo, beneficiando principalmente a productores de Amanalco, articulando análisis de mercado, proceso técnico-administrativo y evaluación financiera como ruta de viabilidad. El enfoque de semi-industrialización es relevante porque permite extender la vida útil, estandarizar la calidad y construir una propuesta de valor alineada con hábitos actuales de conveniencia, salud y origen local, a la vez que fortalece la capacidad de inserción en canales comerciales más exigentes. Asimismo, Ramos et al. (2023) muestran que las características fisicoquímicas y sensoriales de la trucha pueden variar según métodos de procesamiento, lo que sustenta la necesidad de controlar formulaciones y parámetros de proceso para mantener la aceptación y la calidad del producto. Finalmente, la inocuidad constituye un requisito crítico para cualquier iniciativa de transformación alimentaria. En México, la Secretaría de Salud (2009) regula a través de la NOM-251-SSA1-2009, prácticas adecuadas de higiene obligatorias para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios, definiendo requisitos mínimos para prevenir la contaminación a lo largo del proceso productivo. En concordancia, el estudio incorpora la implementación de Buenas Prácticas de Manufactura, las adecuaciones sanitarias y el control operativo como ejes para la producción segura y estandarizada. En suma, el trabajo se fundamentó en: 1. La relevancia estratégica de la acuicultura y su contribución económica reciente, 2. La oportunidad territorial en Valle de Bravo–Amanalco, 3. Tendencias de consumo hacia la conveniencia saludable y 4. La necesidad de cumplimiento sanitario y normativo; elementos que justifican un plan de negocios integral orientado a agregar valor y fortalecer la cadena productiva acuícola regional.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

El plan de negocios puede funcionar como un método dentro de enfoques de investigación-acción, especialmente cuando el objetivo no es solo comprender un fenómeno, sino intervenir para transformarlo. En estos casos, la construcción del plan se alinea con ciclos de planificación–acción–observación–reflexión, lo que genera conocimiento contextualizado y aplicable, un rasgo central de la investigación-acción (De la Varga-Salto & Galindo-Reyes, 2025). Esta lógica se observa también en programas organizacionales donde se diseña, implementa y ajusta un modelo de negocio con base en diagnóstico, levantamiento de información y validación iterativa, lo que confirma que el “artefacto” (plan/modelo) es resultado de un procedimiento investigativo y no solo administrativo (Carvalho, 2025). Además, en el campo de la gestión de la innovación se reconoce que la investigación-acción es particularmente útil porque produce conocimiento riguroso y relevante para la práctica al trabajar con sistemas reales y emergentes, lo cual se ajusta al uso del plan como herramienta de indagación y mejora (Ollila & Yström, 2020). En síntesis, el plan de negocios se consolida como método de investigación cuando se utiliza para: (a) guiar la recolección de datos sobre el mercado y el contexto, (b) diseñar y validar la propuesta de valor con evidencia, (c) describir y justificar los recursos y los procesos operativos, (d) estructurar la organización y sus controles, y (e) evaluar los resultados mediante proyecciones e indicadores financieros. Bajo este enfoque, el plan se interpreta como un procedimiento integrador que permite convertir información dispersa en conocimiento aplicado y defendible, fortaleciendo la coherencia de la propuesta y la calidad de la decisión final (Nakajima & Sekiguchi, 2025). La presente metodología de investigación se desarrolló con un enfoque aplicado y mixto, debido a que integró procedimientos cuantitativos para medir la aceptación del producto, la preferencia de consumo y la disposición de pago, junto con procedimientos cualitativos para documentar, validar y estructurar la operación técnica y administrativa del proyecto, culminando con la evaluación económica mediante herramientas financieras, basada en el diseño de un plan de negocios. El estudio tuvo un alcance descriptivo y propositivo**,** ya que primero caracterizó el mercado, la operación y la organización requeridas; posteriormente, consolidó una propuesta integral de plan de negocios lista para su implementación, sustentada en evidencia de mercado, requerimientos técnicos, estructura administrativa y resultados financieros. La unidad de análisis fue el proyecto de producción y comercialización de un alimento semi-industrializado a base de trucha arcoíris proveniente de las granjas trutícolas de Valle de Bravo, considerando como dimensiones de evaluación su viabilidad comercial, operativa, organizacional y financiera. La delimitación poblacional se estableció a partir del plan de mercado, tomando como referencia una población de 36,601 personas de 20 a 69 años del municipio de Valle de Bravo, complementando la segmentación con criterios geográficos, psicográficos y conductuales asociados a estilos de vida saludables, preferencia por productos regionales y búsqueda de practicidad en la alimentación. El procedimiento metodológico se estructuró de manera secuencial y lógica,

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID016

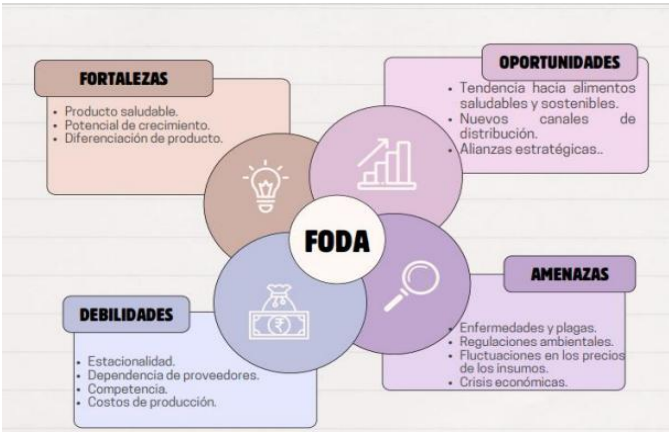
This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

iniciando con el plan de mercado para asegurar que la propuesta respondiera a una necesidad real y medible. En esta etapa se aplicó investigación de mercado considerando una segmentación de tipo demográfico, el diseño y aplicación de encuestas para identificar el nivel de aceptación del producto se realizó mediante un cuestionario estructurado con 15 items buscando medir la dimensión de precio, preferencias organolépticas, frecuencias de consumo, tamaño y empaque de la porción, considerando una población total de 36,601 personas del municipio de Valle de Bravo, comprendidas en un rango de edad de 20 a 69 años, lo que representa el sector económicamente activo de la región. La muestra se determinó considerando un nivel de confianza del 95% y un 5% de error permitido y un nivel de p = 0.50, al desconocer la proporción de aceptación. Con estos datos, se obtuvo un tamaño de muestra de 380 personas para encuestar. Asimismo, para la determinación del precio se consideraron los precios de productos sustitutos como el atún y la sardina y, junto con los datos obtenidos de las encuestas, se determinaron los precios, el tamaño de las porciones y los sabores. Con base en la validación comercial anterior, la investigación avanzó al plan técnico, cuyo objetivo metodológico fue comprobar la factibilidad operativa y sanitaria del proyecto, definiendo la infraestructura, el flujo productivo, el equipamiento y la validación técnica del producto. En esta etapa se determinó la ubicación y el diseño del espacio físico (layout) con áreas funcionales como recepción, almacén y área de transformación, bajo el criterio de adecuación conforme a normas sanitarias y organización del flujo para reducir riesgos de contaminación y garantizar procesos controlados. Asimismo, se identificaron la maquinaria y el equipo necesarios para la producción del alimento industrializado, incluyendo cuchillos para filetes, hornos, empacadoras al vacío, refrigeración industrial y mesas de acero inoxidable, contemplando su instalación y disposición conforme a requerimientos sanitarios y de seguridad. Para la validación del proceso, se incorporó una prueba piloto mediante lotes pequeños, lo que permitió ajustar parámetros críticos de temperatura, textura, sabor y presentación; adicionalmente se desarrollaron las recetas piloto de las tres que prefirieron los encuestados y se realizó una degustación a 25 personas como técnica de evaluación sensorial para valorar aroma, color, textura y aceptación del producto, utilizando los hallazgos para fortalecer la estandarización previa al arranque formal, de ello derivó que las recetas que fueron probadas, resultaran las que se utilizaron en la propuesta. Posteriormente, se integró el plan administrativo como componente metodológico orientado a asegurar la operación continua y el control interno del proyecto. Para ello se definieron lineamientos de identidad y dirección (misión, visión y valores), junto con políticas y estándares de calidad que sirven como criterios de control del producto y del proceso, incluyendo frescura, textura, sabor, apariencia, ausencia de contaminantes, temperatura de conservación y etiquetado. Se diseñó un organigrama con puestos administrativos y operativos (gerencia y responsables de producción, envasado, almacén y ventas) y se elaboraron descripciones de puesto para delimitar responsabilidades, apoyar la contratación y facilitar la supervisión operativa. Como parte del método de aseguramiento operativo, se implementó capacitación por áreas, definiendo funciones específicas para cada responsable y orientando el trabajo al cumplimiento de buenas prácticas, trazabilidad, control de inventarios, manejo de producto y gestión comercial. De manera complementaria, se estableció un mecanismo administrativo de abastecimiento mediante una base de datos de proveedores, priorizando proveedores confiables de la región para sostener el suministro y la continuidad productiva; finalmente, se consideró el inicio de producción con controles y la planificación del lanzamiento comercial mediante un cronograma como cierre operativo e integración al plan de negocios. Finalmente, la investigación incorporó el plan financiero como metodología de evaluación económica, aplicando procedimientos de cuantificación, presupuestos, proyecciones y evaluación de indicadores para confirmar la rentabilidad y la sostenibilidad.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de mercado realizado permitió identificar una oportunidad real para introducir un alimento industrializado elaborado a base de trucha arcoíris proveniente de las granjas trutícolas de Valle de Bravo. Las encuestas aplicadas demostraron que la población de 20 a 69 años, perteneciente principalmente a los niveles socioeconómicos medio y medio-alto, mostró una alta disposición a consumir productos saludables, prácticos y de origen local. Entre las diferentes presentaciones evaluadas, la trucha en aceite fue la opción más aceptada por su sabor y alto valor nutrimental, seguida por la trucha a la vinagreta y la trucha en ensalada. El estudio también reveló que la oferta actual en la región se concentra en productos frescos, con escasa diversificación y una infraestructura de procesamiento limitada, lo que genera un vacío comercial propicio para el desarrollo de productos con valor agregado. Lo cual queda de manifiesto a través del estudio de mercado que arrojó el análisis FODA del mercado estudiado el cual se presenta en la Figura 1. Análisis FODA.

Figura 1
Análisis FODA



Se obtuvieron también, las presentaciones preferidas y los factores determinantes de compra; con los resultados se confirmó la preferencia por las versiones evaluadas, además de reforzarse el análisis con un ejercicio de equilibrio de oferta

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID016

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

y demanda planteado en el documento. Se estima una cantidad de 22 mil 200 porciones anuales, basada en los datos obtenidos del estudio de mercado. A partir de esta evidencia, se orientaron criterios metodológicos para la estrategia comercial, considerando los enfoques de producto, precio, canales y promoción, priorizando la difusión de atributos como el origen regional, los beneficios nutricionales, la practicidad y la sostenibilidad, mediante la venta local, ferias, puntos turísticos, restaurantes y medios digitales. La competencia directa es reducida y se basa principalmente en la trucha fresca, lo que facilita el posicionamiento de un producto procesado, especialmente si resalta atributos como calidad, frescura y origen regional. Sin embargo, existen productos sustitutos ya posicionados en el gusto del consumidor, como la sardina y el atún, en sus diferentes presentaciones. En cuanto al precio, las encuestas indicaron que el valor más adecuado para una porción de 125 gramos es de $70.00, ya que fue percibido como justo, accesible y acorde con la calidad del producto. Este precio coincide con el punto de equilibrio obtenido al igualar las funciones de oferta y demanda, lo que confirma su viabilidad económica, aunque, al determinar el precio, este se ajustó a los costos y gastos de los insumos integrados en la preparación de cada una de las recetas. Además, se identificó que los consumidores valoran fuertemente los empaques que contengan información nutrimental y de consumo, atractivos y funcionales, así como la facilidad de preparación del producto. En conjunto, los resultados confirman que el mercado presenta condiciones favorables para el lanzamiento del alimento industrializado a base de trucha arcoíris, con una demanda creciente, un nicho de consumidores claramente identificado y un precio óptimo que garantiza la aceptación y la rentabilidad.

Asimismo, la investigación muestra que la diferenciación del producto, la comunicación de sus beneficios nutricionales y la identidad local serán factores clave para su posicionamiento exitoso en el mercado regional. Relacionados con el plan técnico y el plan administrativo, los hallazgos obtenidos muestran la infraestructura necesaria; así como la adecuación de las áreas de trabajo conforme a la normativa sanitaria, incorporando un diseño lineal que garantiza la inocuidad en cada etapa del proceso.

Asimismo, la adquisición e instalación de equipos para las áreas especializadas como: fileteado, cocción, envasado al vacío y cámara de refrigeración, como se muestra en la Figura 1. Activos Fijos o Bienes de Capital, que forman parte de la inversión inicial necesaria para echar a andar el proyecto en cuestión.

Figura 1

Activos Fijos o Bienes de Capital

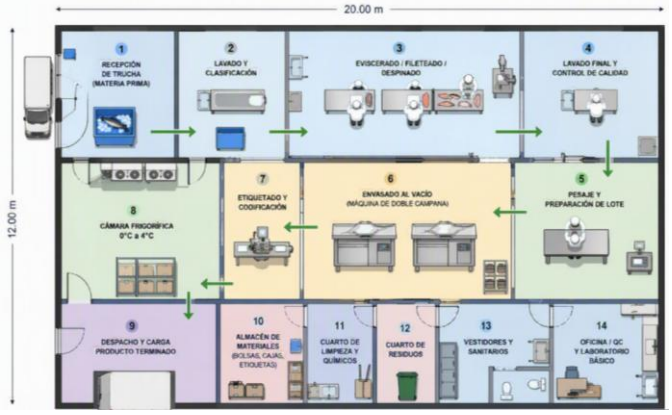
INVERSIÓN INICIAL					
CANTIDAD	CONCEPTO	PRECIO UNITARIO		PRECIO TOTAL	
1	Fileteadora de pesacado semiautomática	$	90.000,00	$	90.000,00
1	Mezcladora industrial grado alimenticio	$	45.000,00	$	45.000,00
1	Envasadora al vacio	$	50.000,00	$	50.000,00
1	Selladora de termoformado o sellado manual	$	25.000,00	$	25.000,00
1	Cámara de refrigeración 8 metros cúbicos	$	75.000,00	$	75.000,00
1	Estufa para preparación de vinagretas	$	25.000,00	$	25.000,00
3	Mesas de acero inoxidable	$	12.000,00	$	36.000,00
2	Básculas de precisión	$	4.000,00	$	8.000,00
1	Juego de equipo de higiene y utensilios	$	30.000,00	$	30.000,00
1	Vehículo de carga y reparto	$	150.000,00	$	150.000,00
	TOTAL BIENES DE CAPITAL O ACTIVOS FIJOS			$	534.000,00

Con todo ello, se asegura un flujo productivo eficiente y la elaboración de productos con mayor vida útil y calidad estandarizada. Las pruebas piloto confirmaron que los equipos y procedimientos cumplen con los parámetros de temperatura, textura, presentación y seguridad alimentaria requeridos para iniciar una operación continua. Por ello en la Figura 2. Se muestra la distribución de planta o layout de la factoría, en la que se puede observar un área construida de 240 metros cuadrados de un total de 800 metros cuadrados de terreno, inmueble ubicado en el municipio de Donato Guerra, Estado de México.

En ella se puede observar el carácter lineal del proceso de producción y las distintas áreas necesarias para una producción semindustrializada.

Figura 2

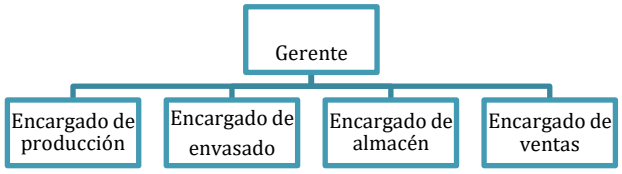
Distribución de planta de factoría



En el ámbito administrativo, los resultados evidenciaron la consolidación de una estructura organizacional funcional, apoyada en descripciones de puesto claras y una distribución adecuada de responsabilidades. Esto se logra mediante la contratación y capacitación del personal conforme a criterios de Buenas Prácticas de Manufactura, control de calidad y operación segura de la maquinaria, fortaleciendo la capacidad operativa del proyecto y considerando los perfiles de puesto adecuados para cada cargo del organigrama.

Figura 3

Organigrama funcional



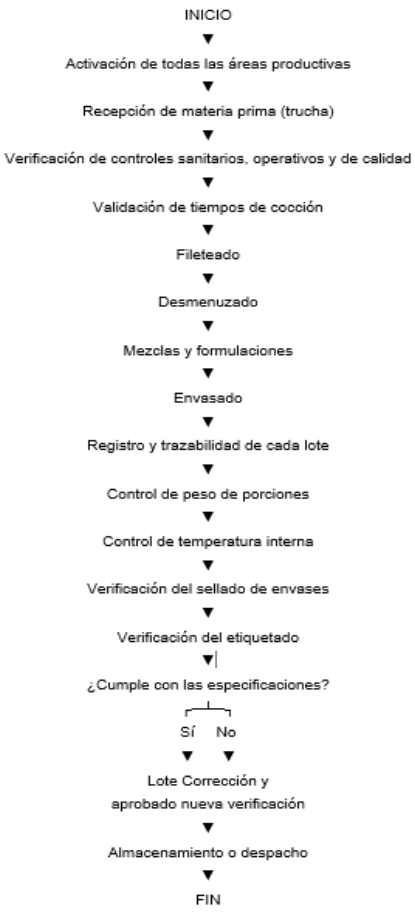
Además, se estableció un sistema de vinculación con proveedores confiables, garantizando la disponibilidad de insumos y materias primas conforme a estándares de calidad que permitan realizar el proceso de elaboración que se muestra en la Figura 4. Flujograma de elaboración de trucha semi-industrializada, donde se identifican las actividades desde la recepción de insumos hasta la salida del producto, pasando por todo el proceso de semi-industrialización, resaltando la verificación de los controles sanitarios operativos y de calidad, validación de tiempos de cocción, la formulación y mezclado de los ingredientes; así como, los diferentes controles durante el proceso de preparación, pesado, elaboración, envasado,

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID016

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

sellado, verificación y almacenamiento; listo para la venta o distribución, que son adecuadas a los espacios necesarios para la elaboración de las tres diferentes líneas de productos propuestos.

Figura 4
Flujograma de elaboración de trucha semi-industrializada



El desarrollo de marca, la elaboración de etiquetas reguladas y la planificación del lanzamiento comercial contribuyeron a consolidar la identidad del producto y prepararlo para su introducción al mercado. Los resultados del plan financiero demuestran que el proyecto de elaboración de alimento industrializado a base de trucha arcoíris es económicamente viable, rentable y sostenible a mediano plazo. Se determinó una inversión inicial total de $534,000.00, que incluye infraestructura, maquinaria, refrigeración y utensilios. Dicho financiamiento se integró con un crédito de $250,000 a cuatro años con 30% de interés anual y el resto, capital propio aportado por los futuros socios accionistas, incorporando su esquema de amortización como evidencia de la estructura de financiamiento. Se clasificaron costos en fijos anuales por $161,640.00 y variables por $471,450.00 asociados a materia prima (trucha, soya y condimentos), empaque y distribución, para obtener un presupuesto de costos anual estimado de $633,090.00 base para el análisis de rentabilidad y equilibrio. Con la capacidad productiva y el precio de mercado se proyectaron ventas anuales de $1’347,000.00 en el primer año con un ligero incremento en los siguientes años, como se muestra en la Figura 5. Ventas Proyectadas, siendo sostenido el incremento proyectado considerando indicadores macroeconómicos de inflación y PIB del sector en los años 2027, 2028 y 2029:

Figura 5
Ventas Proyectadas

TRUCHA EN ACEITE	BASE	2027	2028	2029
CANTIDAD	6000	6228	6465	6710
PRECIO	$70.00	$72.45	$74.99	$77.61
TOTAL	$420,000,00	$451,218,60	$484,757,68	$520,789,72
TRUCHA EN VINAGRETA				
CANTIDAD	7200	7474	7758	8052
PRECIO	$60.00	$62.10	$64,27	$66.52
TOTAL	$432,000,00	$464,110,56	$498,607,90	$535,669,42
TRUCHA EN ENSALADA				
CANTIDAD	9000	9342	9697	10065
PRECIO	$55.00	$56.93	$58.92	$60.98
TOTAL	$495,000,00	$531,793,35	$571,321,55	$613,787,88
VENTAS TOTALES	**$1’347,000,00**	**$1’447,122,51**	**$1’554,687,13**	**$1’670,247,02**

Con la información presupuestada, se determinaron las utilidades anuales, como se muestra en la Figura 6. Estado de resultados proyectado, en donde se puede observar un incremento en los beneficios económicos correspondientes a los ejercicios 2027, 2028 y 2029.

Figura 6
Estado de Resultados proyectado

ESTADO DE RESULTADOS PROYECTADO PARA LA TRUCHA SEMI-INDUSTRIALIZADA				
	AÑO BASE	2027	2028	2029
VENTAS	$ 1.347.000,00	$ 1.447.122,51	$ 1.554.687,13	$ 1.670.247,02
COSTOS DE VENTAS	$ 724.590,00	$ 771.342,75	$ 821.293,47	$ 874.668,09
UTILIDAD BRUTA	**$ 622.410,00**	**$ 675.779,76**	**$ 733.393,66**	**$ 795.578,93**
GASTOS DE OPERACIÓN				
GASTOS DE ADMINISTRACIÓN	$ 134.700,00	$ 139.414,50	$ 144.294,01	$ 149.344,30
GASTOS DE VENTAS	$202.050,00	$ 216.799,65	$ 232.626,02	$ 249.607,72
GASTOS FINANCIEROS	$70.687,50	$ 44.708,33	$ 65.182,87	-$ 13.291,67
TOTAL DE GASTOS DE OPERACIÓN	$407.437,50	$ 400.922,48	$ 442.102,90	$ 385.660,36
UTILIDAD DE OPERACIÓN	**$214.972,50**	**$ 274.857,28**	**$ 291.290,75**	**$ 409.918,58**
PTU O RUT (10%)	$21.497,25	$ 27.485,73	$ 29.129,08	$ 40.991,86
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	$193.475,25	$ 247.371,55	$ 262.161,68	$ 368.926,72
ISR (30%)	$58.042,58	$ 74.211,46	$ 78.648,50	$ 110.678,02
UTILIDAD O PÉRDIDA NETA	**$135.432,68**	**$ 173.160,08**	**$ 183.513,18**	**$ 258.248,70**

Asimismo, se determinaron los flujos netos de efectivo, como se muestra en la Figura 7. Estado de Flujo Neto de Efectivo la cual se determinó con los datos de los Estado de Resultados, de la Depreciación y del Pago de Capital:

Figura 7
Estado de Flujo Neto de Efectivo

ESTADO DE FLUJO NETO DE EFECTIVO				
AÑOS	BASE	2027	2028	2029
UTILIDAD NETA ANUAL	$ 135.432,68	$ 173.160,08	$ 183.513,18	$ 258.248,70
DEPRECIACIÓN ANUAL	$ 253.650,00	$ 253.650,00	$ 253.650,00	$ 253.650,00
CAPITAL PAGADO ANUALMENTE	$ 83.333,33	$ 83.333,33	$ 83.333,33	$ 83.333,33
FLUJO NETO DE EFECTIVO	$ 305.749,34	$ 343.476,75	$ 353.829,84	$ 428.565,37

Con dicha información se calculó el rendimiento del proyecto, que se presenta en la figura 8 Tasa Interna de Retorno, siendo esta la parte más importante de la evaluación financiera. Esta estimación se consolidó mediante indicadores como el Periodo de Recuperación de la Inversión, el cual proporcionó un dato de dos años, tres meses y 15 días para la recuperación de lo invertido. Asimismo, se reportó un VAN de $55,220.68 a una tasa de rendimiento mínima aceptada (TREMA) de 25% anual, obteniendo una TIR de 30% anual, lo cual respalda que el

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID016

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

proyecto genera valor y mantiene un desempeño rentable. Es importante valorar este rendimiento como una ventaja para invitar a inversionistas potenciales, los cuales verían atractivo aportar recursos financieros y recibir una fracción del beneficio que genera el proyecto.

Figura 8
Tasa Interna de Retorno

TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)		
Año		Flujos Netos de Efectivo (FNE)
Inversión Inicial	-$	752.100,00
Base	$	305.749,34
2027	$	343.476,75
2028	$	353.829,84
2029	$	428.565,37
		Tasa Interna de Rendimiento (TIR) 30% anual

En síntesis, la metodología de plan de negocios integró los cuatro componentes como un proceso de validación progresiva: el plan de mercado aportó la evidencia empírica sobre aceptación, segmentación y precio; el plan técnico comprobó la capacidad de producir bajo condiciones controladas y con equipamiento definido; el plan administrativo estructuró la operación mediante roles, políticas y características organizacionales; y el plan financiero verificó la viabilidad económica mediante presupuestos, proyecciones e indicadores, logrando una sinergia metodológica que consolida un plan de negocios coherente, sustentado y aplicable al contexto productivo de la trucha arcoíris en Valle de Bravo.

IV. CONCLUSIONES

Los hallazgos del estudio sugieren importantes implicaciones en términos de expansión regional, ya que el modelo productivo propuesto no se limita únicamente al mercado local de Valle de Bravo, sino que presenta condiciones favorables para replicarlo en municipios vecinos y regiones con características socioeconómicas y productivas similares; incluso puede integrarse a los programas de gobierno, sobre todo del Estado de México, de dotación en la despensa familiar que entrega a la población de menos ingresos. Por otro lado, la demanda identificada de alimentos saludables, prácticos y con valor nutricional permite proyectar la comercialización del producto hacia mercados regionales y estatales, ampliando los canales de distribución y fortaleciendo la competitividad del sector acuícola de la región, mejorando las condiciones de vida de la población que se dedica a ello, directa e indirectamente. Esta expansión contribuiría a reducir la dependencia de la venta de trucha fresca, a diversificar el portafolio de productos y a generar economías de escala que mejoren la rentabilidad del proyecto y la estabilidad de los ingresos de los productores. Pero, sobre todo, mejorar la calidad de vida de los productores de trucha en la región.

Asimismo, el proyecto impulsa el fortalecimiento de la cadena productiva acuícola, al integrar de manera sistemática a productores, proveedores de insumos, procesos de transformación, comercialización y consumo final. La incorporación de procesos de semi-industrialización favorece una mayor articulación entre los actores locales, fomenta la profesionalización del sector y reduce las mermas, lo que promueve un uso más eficiente del recurso. Esto genera un impacto positivo tanto económico como social, al incentivar la generación de empleo, la transferencia de conocimientos técnicos y la consolidación de prácticas productivas más sostenibles.

La originalidad del proyecto radica en la integración de un modelo de semi-industrialización sustentable basado en recursos locales, que combina innovación productiva con identidad regional y responsabilidad ambiental. Al aprovechar la trucha arcoíris producida en Valle de Bravo y aplicar procesos controlados de transformación, se logra agregar valor sin comprometer la calidad ni el entorno, posicionando al proyecto como una alternativa viable, sostenible y replicable para el desarrollo de microindustrias alimentarias en zonas acuícolas rurales.

Entre las limitaciones del estudio destacan su enfoque exclusivo en el mercado local de Valle de Bravo, así como el uso de proyecciones financieras estimadas, lo que genera incertidumbre respecto a la sostenibilidad comercial del producto en escenarios reales de mercado. La dependencia de un mercado geográficamente reducido puede representar un riesgo significativo, ya que la demanda local podría resultar insuficiente para absorber de manera constante los volúmenes necesarios para cubrir los costos operativos, especialmente ante variaciones en el poder adquisitivo de los consumidores o cambios en sus preferencias alimentarias. Por otro lado, aspectos sobre el cambio climático están cambiando el contexto de la geografía de la región, lo que está haciendo que la producción disminuya significativamente, llevando a que algunas granjas tengan que suspender su actividad productiva, lo que podría limitar el desarrollo del proyecto en el mediano y largo plazo. En una noticia que se publicó en mayo de 2025 en el Estado de México, el Director General de la Secretaría del Campo del Gobierno del Estado de México señaló que “había platicado con la nueva viga para acercar a algunos productores para la comercialización de sus productos, pero desafortunadamente la disminución en la producción de trucha ha ido creciendo por el cambio climático y la reducción de agua”. *El porcentaje de disminución de trucha es de alrededor del 3%”, apuntó”* (Prado, 2025). Asimismo, la ausencia de información empírica sobre la respuesta de mercados regionales o externos limita la capacidad de anticipar el comportamiento de la competencia y las posibles barreras de entrada a nuevos canales de distribución, debido principalmente a la falta de costumbre que el consumidor muestra del consumo de trucha envasada e industrializada como una alternativa en su dieta de consumir productos proteicos a base de trucha arcoíris. En este contexto, aunque el proyecto presenta una propuesta innovadora basada en la semi-industrialización sustentable de la trucha arcoíris, la falta de validación en mercados más amplios podría afectar la viabilidad económica y la proyección de crecimiento del producto. De no concretarse una estrategia efectiva de expansión regional y fortalecimiento de la cadena productiva acuícola, el modelo podría enfrentar dificultades para alcanzar economías de escala, mantener márgenes de rentabilidad estables y consolidarse como una alternativa competitiva a largo plazo. Desde una perspectiva más crítica, la viabilidad del producto queda condicionada por una baja validez externa del estudio, debido a que la evidencia empírica se construye fundamentalmente sobre un mercado local acotado (36,601

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID016

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

personas de 20 a 69 años en Valle de Bravo) y, por tanto, no demuestra que la demanda observada sea transferible a contextos regionales con estructuras de consumo, competencia, poder adquisitivo y canales de distribución distintos. En términos metodológicos, esto introduce un riesgo de sesgo de estimación (p. ej., preferencias infladas por cercanía al producto regional o por exposición durante sondeos) y una alta incertidumbre paramétrica al extrapolar resultados hacia mercados más amplios. Adicionalmente, los indicadores financieros reportados (inversión inicial, crédito, VAN y TIR) dependen de supuestos proyectivos sensibles a pequeñas variaciones en costos de insumos, logística de cadena fría, mermas, cumplimiento sanitario y estabilidad de precios, por lo que podrían incurrir en optimismo de modelo si la volatilidad real supera lo contemplado, que podría incluir aspectos como la baja preferencia por trucha procesada, el cambio climático que afecta a los productores. Incluso la determinación del precio "óptimo" ($70 por porción) y del punto de equilibrio se basa en preferencias y ecuaciones simplificadas que podrían no captar fricciones reales de mercado (competencia, elasticidad-precio efectiva, costos de colocación y comisiones de canal), lo que eleva el riesgo de que el proyecto no alcance economías de escala y presente márgenes insuficientes para sostener amortizaciones, reinversión y expansión. En consecuencia, si la expansión regional no se valida con evidencia adicional y no se logra una coordinación robusta de la cadena productiva (abasto estandarizado, procesamiento, inocuidad, distribución), el modelo puede enfrentar fragilidad operativa y déficit financiero frente a escenarios de mercado realistas.

Asimismo, El estudio permitió demostrar que la semi-industrialización de la trucha arcoíris en la región de Valle de Bravo, constituye una alternativa viable, rentable y estratégicamente alineada con las tendencias actuales de consumo y con las necesidades de diversificación productiva del sector acuícola local. La integración del análisis de mercado, la validación técnica, la estructuración administrativa y la evaluación financiera permitió construir un modelo integral capaz de transformar un producto primario en una oferta con valor agregado, mayor vida útil y atractivo comercial, sustentado en procesos controlados y en el cumplimiento de las normativas sanitarias. Los resultados revelaron una alta aceptación del producto por parte de los consumidores, un precio competitivo y un punto de equilibrio alcanzable, lo que se traduce en condiciones favorables para su introducción al mercado. De igual manera, la infraestructura, el flujo de procesos y la profesionalización del personal confirman la factibilidad operativa del proyecto conforme a estándares de calidad e inocuidad. Si bien el estudio presenta limitaciones derivadas de su enfoque en un mercado local y del uso de proyecciones financieras estimadas, los hallazgos evidencian una oportunidad significativa para la expansión regional del modelo y el fortalecimiento de la cadena productiva acuícola. En conjunto, la investigación concluye que el proyecto no solo es económicamente viable, sino que también tiene potencial para impulsar el desarrollo regional mediante la generación de empleo, el aprovechamiento eficiente de recursos locales y la consolidación de microindustrias alimentarias con enfoque sustentable, considerando la información de mercado, técnica y financiera proyectada.

V. AGRADECIMIENTOS

Se expresa el más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron al desarrollo de la presente investigación sobre la industrialización de la trucha arcoíris en la región de Valle de Bravo.

De manera especial, se reconoce la valiosa colaboración de los productores trutícolas de los municipios de Valle de Bravo y Amanalco, quienes compartieron información relevante y recursos sobre los procesos de producción y comercialización, así como los desafíos que enfrenta actualmente el sector acuícola regional. Su experiencia y disposición fueron fundamentales para la elaboración y validación de la propuesta presentada.

Asimismo, se agradece a los consumidores y participantes de las encuestas y pruebas de aceptación sensorial, cuya participación permitió identificar preferencias, hábitos de consumo y niveles de aceptación de los productos elaborados a base de trucha arcoíris, lo que aportó información indispensable para el estudio de mercado.

Los autores extienden su reconocimiento al Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, por el apoyo académico, la infraestructura y las facilidades otorgadas para el desarrollo de las actividades de investigación, análisis y elaboración del plan de negocios.

Se agradece también a los estudiantes inscritos en el proyecto, que colaboraron en la recolección de datos, aplicación de entrevistas y encuestas, contribuyendo al fortalecimiento metodológico, técnico y financiero del proyecto, favoreciendo la calidad y pertinencia de los resultados obtenidos.

Finalmente, se reconoce a todas las personas que, de manera directa o indirecta, apoyaron la realización de este trabajo, cuyo propósito es contribuir al fortalecimiento de la cadena productiva acuícola regional, promover la generación de valor agregado en la producción de trucha arcoíris y fomentar alternativas de desarrollo económico sostenible para las comunidades productoras de la región.

VI. REFERENCIAS

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (01 de Abril de 2024). *Ley General de Pesca y Acuacultura Sustentables*. Obtenido de https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPAS.pdf?

Carvalho, P. J. (2025). Estrategias para la innovación en modelos de negocios mediante cocreación externa. *Ciencias Administrativas Revista Digital FCE UNLP*, 3-38. https://doi.org/10.24215/23143738e161

Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca. (17 de Enero de 2024). *Gobierno de México*. Obtenido de https://www.gob.mx/conapesca/prensa/produce-mexico-mas-de-1-millon-900-mil-toneladas-de-especies-pesqueras-y-acuicolas-en-2023?idiom=es-MX&

De la Varga-Salto, J. M., & Galindo-Reyes, F. C. (2025). Investigación acción y la evolución de modelos de negocios a través del navegador de modelos de negocios (business model navigator): un caso de estudio. *Formación Universitaria, 18*(3). http://dx.doi.org/10.4067/s0718-50062025000300145

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Gobierno de México. (2009). *Diario Oficial de la Federación. Normas Oficiales*. Obtenido de https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/3980/salud/salud.htm?

González, F. G., Peinado, G. V., & Peinado, G. H. (2024). Análisis de las tendencias de la industria de la nutrición acuícola en Sinaloa,. *Repositorio Universitario de del Instituto de Investigaciones Económicas*, 163-180. Obtenido de http://ru.iiec.unam.mx/6428/1/09-155-Gonz%C3%A1lez-Peinado-Peinado.pdf

Nakajima, H., & Sekiguchi, T. (2025). Is Business Planning Useful for Entrepreneurs? A Review and Recommendations. *Busnisses MDPI, 10*(5). https://www.researchgate.net/deref/https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.3390%2Fbusinesses5010010?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicG9zaXRpb24iOiJwYWdlQ29udGVudCJ9fQ

Ollila, S., & Yström, A. (2020). Action research for innovationmanagement: three benefits,three challenges, and three spaces. *R&D Managment, 50*(3) https://doi.org/10.1111/radm.12407?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle.

Prado, B. (26 de Mayo de 2025). Producción de trucha disminuye por efectos climáticos en Edomex. *La Jornada, Estado de México*. Obtenido de https://lajornadaestadodemexico.com/produccion-de-trucha-disminuye-por-efectos-climaticos-en-edomex/

Ramos, M., Bustillos, R., Santolalla, S., Tuesta, T., Silva-Paz, R., & Jordán-Suárez, Ó. (2023). Efecto de cinco métodos de cocción en las características fisicoquímicas, nutricionales y sensoriales de trucha arcoiris (Oncorhynchus mykiss). *Revistas de Universidad de Trujillo*. Obtenido de https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop/article/view/4911/6695

Sepúlveda, H. S., Gómez, D. W., García, M. D., Moctezuma, P. s., & Vizcarra, I. I. (2021). Una aproximación a la innovación inclusiva entre productores de trucha arcoíris (Oncorhynchus mykiss) del Estado de México. *Iberoforum, Revista de Ciencias Sociales*, 1-31. https://doi.org/10.48102/if.2021.v1.n2.170

The Food Tech. (21 de Octubre de 2024). *Cenas saludables y conveniencia: la evolución del mercado de alimentos preparados en México.* Obtenido de https://thefoodtech.com/packaging-y-procesamiento/cenas-saludables-y-conveniencia-la-evolucion-del-mercado-de-alimentos-preparados-en-mexico/

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID016

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización [Conceptualization]	González-Flores, Adalberto; Santos-García, Adrián
2	Curación de datos [Data curation]	No aplica
3	Análisis formal [Formal analysis]	Hernández-Sánchez, Josefina; Santos-García, Adrián
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	González-Flores, Adalberto; Hernández-Sánchez, Josefina; Santos-García, Adrián
5	Investigación [Investigation]	González-Flores, Adalberto; Hernández-Sánchez, Josefina; Santos-García, Adrián
6	Methodología [Methodology]	González-Flores, Adalberto; Hernández-Sánchez, Josefina
7	Administración del proyecto [Project administration]	Hernández-Sánchez, Josefina; Santos-García, Adrián
8	Recursos [Resources]	González-Flores, Adalberto; Hernández-Sánchez, Josefina; Santos-García, Adrián
9	Software [Software]	No aplica
10	Supervision [Supervision]	González-Flores, Adalberto; Hernández-Sánchez, Josefina; Santos-García, Adrián
11	Validación [Validation]	González-Flores, Adalberto; Santos-García, Adrián
12	Visualización [Visualization]	Santos-García, Adrián
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Hernández-Sánchez, Josefina
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	González-Flores, Adalberto

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID016

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Evaluación Comparativa de YOLOv8, YOLOv11 y YOLOv26 para la Detección Automática de Mosquitos y Larvas de *Aedes aegypti*

Comparative Evaluation of YOLOv8, YOLOv11, and YOLOv26 for the Automatic Detection of *Aedes aegypti* Mosquitoes and Larvae

Campa-Ramírez, E.R.[1]; González-Vargas, L. A.[2] ✉; Alvarado-Tovar, N.[3]; Vidaña-Martínez, S.A.[4]; Hernández-Rodríguez, R.[5].

Datos de Adscripción:

[1] Campa Ramírez, Edson Raúl
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de la Laguna.
División de Estudios de Posgrado e Investigación. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/00xbw4a70
m.ercampar@lalaguna.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3327-5912

[2] ✉ González Vargas, Luis Amado
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Departamento de Posgrado. Ciudad Lerdo, Durango. México
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
luis.gv@lerdo.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9094-6188

[3] Alvarado Tovar, Noé
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de la Laguna.
División de Estudios de Posgrado e Investigación. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/00xbw4a70
nalvarado@lalaguna.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0218-0813

[4] Vidaña Martínez, Silvia Adriana
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo
División de Ingeniería Ambiental. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
silvia.vm@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9633-1010

[5] Hernández Rodríguez, Rubén
Tecnológico Nacional de México / ITS de San Pedro de las Colonias.
División de Ingeniería en Sistemas Computacionales. San Pedro, Coahuila. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/0134he436
rhernandez@tecsanpedro.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6903-9988

Resumen **- El dengue representa una de las principales amenazas para la salud pública en México, con aproximadamente 125 000 casos y cerca de 480 defunciones registradas en 2024. La Región Lagunera, ubicada en el estado de Coahuila, es una zona vulnerable debido a las condiciones climáticas que favorecen la proliferación del vector Aedes aegypti. Los métodos tradicionales de vigilancia entomológica, basados en el conteo manual de mosquitos y larvas, presentan limitaciones en cuanto al tiempo de procesamiento, la susceptibilidad al error humano y la baja capacidad de respuesta oportuna. En este contexto, el presente estudio evalúa y compara el desempeño de las versiones 8, 11 y 26 del algoritmo You Only Look Once para la detección automática de mosquitos adultos y larvas de Aedes aegypti. Se construyó un conjunto de datos con dos clases, etiquetado mediante cajas delimitadoras y dividido en subconjuntos de entrenamiento, validación y prueba. Los modelos fueron entrenados bajo condiciones homogéneas y evaluados mediante métricas de precisión, exhaustividad, medida armónica entre ambas métricas y precisión promedio, además de análisis de matrices de confusión y rendimiento computacional. Los resultados permitieron identificar la arquitectura con el mejor equilibrio entre exactitud de detección y eficiencia computacional, lo que contribuye al desarrollo de herramientas automatizadas para el monitoreo epidemiológico en regiones vulnerables.**

Palabras clave: ***Aedes aegypti, Aprendizaje profundo, Dengue, Detección de objetos, Vigilancia vectorial, You Only Look Once.***

Abstract **- Dengue is one of the major public health threats in Mexico, with approximately 125,000 reported cases and nearly 480 deaths recorded during 2024. The Laguna Region, in the state of Coahuila, is considered vulnerable because its climatic conditions favor the proliferation of the vector Aedes aegypti. Traditional entomological surveillance methods, based on the manual counting of mosquitoes and larvae, present limitations related to processing time, susceptibility to human error, and limited capacity for timely response. In this context, the present study evaluates and compares versions 8, 11, and 26 of the You Only Look Once algorithm for automatic detection of adult mosquitoes and Aedes aegypti larvae. We constructed a two-class dataset, annotated with bounding boxes, and divided it into training, validation, and test subsets. The models were trained under homogeneous conditions and evaluated using precision, recall, the harmonic mean of precision and recall, and mean average precision, along with confusion matrix analysis and computational performance assessment. The results identified the architecture that best balances detection accuracy and computational efficiency, contributing to the development of automated tools for epidemiological surveillance in vulnerable regions.**

Keywords: ***Aedes aegypti, deep learning, dengue, object detection, vector surveillance, You Only Look Once.***

I. INTRODUCCIÓN

El dengue constituye la arbovirosis de mayor impacto a nivel mundial, con aproximadamente 390 millones de infecciones anuales, y representa uno de los principales desafíos para los sistemas de salud pública debido a su rápida expansión geográfica y al incremento sostenido de su incidencia. En México, durante 2024 se registraron alrededor de 125 000 casos

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID030

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

confirmados y 480 defunciones, lo que evidencia una tendencia ascendente de la enfermedad y una creciente vulnerabilidad en entidades como Colima y Jalisco (Cremades et al., 2026). Asimismo, la incidencia nacional aumentó de 29.4 a 279.0 casos por cada 100 000 habitantes entre 2022 y 2024, extendiéndose al 68.6 % de los municipios del país, lo que refleja una rápida dispersión de Aedes aegypti (Mendoza-Cano et al., 2025).

En la Región Lagunera del estado de Coahuila, las condiciones climáticas favorecen el establecimiento y proliferación del vector, registrándose recientemente 5 725 casos confirmados. Ante este panorama, la vigilancia entomológica constituye una herramienta fundamental para la detección temprana y el control oportuno de brotes epidémicos. Sin embargo, los métodos tradicionales, basados en la inspección manual de ovitrampas, larvas y mosquitos adultos, siguen siendo procesos laboriosos, dependientes de personal especializado y susceptibles a errores humanos, lo que limita la capacidad de respuesta de los programas de vigilancia epidemiológica (Sasmita et al., 2021).

En los últimos años, la inteligencia artificial y, en particular, el aprendizaje profundo, han demostrado un elevado potencial para automatizar tareas de identificación y clasificación en aplicaciones de visión por computadora. En el ámbito de la vigilancia entomológica, Javed et al. (2023), desarrollaron EggCountAI, un sistema basado en redes neuronales convolucionales capaz de alcanzar exactitudes de hasta 98.88 % en el conteo automático de huevos de Aedes aegypti. De manera similar, Duan et al. (2026) propusieron LW-YOLO, una versión ligera de la arquitectura YOLO (You Only Look Once) que redujo en aproximadamente un 60 % el número de parámetros del modelo, manteniendo valores de mAP@50 superiores a 0.97 para la detección de mosquitos adultos. Estos trabajos demuestran la viabilidad técnica del aprendizaje profundo para fortalecer los sistemas automatizados de vigilancia entomológica, especialmente en escenarios con limitaciones computacionales.

Dentro de este contexto, la familia YOLO se ha consolidado como una de las arquitecturas de detección de objetos más utilizadas, debido a su capacidad para equilibrar la precisión de detección y la velocidad de inferencia. La evolución de estas arquitecturas, desde YOLOv8 hasta YOLOv11, ha incorporado mejoras en los mecanismos de atención, las estrategias de extracción de características y el escalamiento dinámico, lo que ha incrementado la eficiencia computacional sin afectar significativamente la precisión de la detección. No obstante, estudios recientes indican que las diferencias de desempeño entre generaciones sucesivas suelen ser reducidas cuando se emplean conjuntos de datos específicos, lo que sugiere que las innovaciones actuales están orientadas principalmente a optimizar la implementación en dispositivos de borde y sistemas embebidos, más que a incrementar sustancialmente la exactitud de la clasificación (Hung & Rodríguez, 2025; Hendriko & Hermanto, 2025).

A pesar de estos avances, la mayoría de las investigaciones publicadas se ha centrado en una única etapa del ciclo biológico del mosquito (larvas o adultos), ha empleado conjuntos de datos obtenidos en condiciones altamente controladas o ha evaluado una sola arquitectura de detección. En consecuencia, son escasos los estudios que comparan distintas generaciones de modelos YOLO utilizando un protocolo experimental homogéneo e incorporando simultáneamente indicadores de precisión de detección, de capacidad de localización espacial y de eficiencia computacional. Esta limitación dificulta la selección objetiva de la arquitectura más adecuada para aplicaciones de vigilancia epidemiológica en regiones endémicas como la Comarca Lagunera, donde las condiciones ambientales representan un desafío adicional para los sistemas de detección automática.

En este contexto, el presente estudio desarrolla una evaluación experimental comparativa del desempeño de YOLOv8, YOLOv11 y YOLOv26 para la detección automática de larvas y mosquitos adultos de Aedes aegypti y Culex. Para ello, se construyó un conjunto de datos estandarizado con imágenes adquiridas bajo diferentes condiciones de iluminación, orientación, fondo y escala, las cuales fueron etiquetadas mediante bounding boxes y divididas en subconjuntos de entrenamiento (70 %), validación (20 %) y prueba (10 %). Los modelos fueron entrenados bajo un protocolo homogéneo de hiperparámetros y número de épocas, lo que garantiza una comparación objetiva entre arquitecturas. Su desempeño se evaluó mediante métricas ampliamente aceptadas en detección de objetos (Precisión, Recall, F1-score, mAP50, mAP50-95, matrices de confusión), así como mediante análisis de convergencia, estabilidad del entrenamiento y rendimiento computacional (tiempo de inferencia y cuadros por segundo, FPS).

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1. Metodología

La presente investigación se desarrolló con un enfoque experimental comparativo, orientado a evaluar el desempeño de tres arquitecturas de detección de objetos basadas en aprendizaje profundo (YOLOv8, YOLOv11 y YOLOv26) en condiciones homogéneas de entrenamiento y validación. El diseño experimental se estructuró siguiendo las recomendaciones para la evaluación objetiva de modelos de visión por computadora, manteniendo constantes los hiperparámetros, la resolución de entrada y los criterios de evaluación, con el fin de minimizar los sesgos durante la comparación (Ultralytics, 2024; Jocher et al., 2024).

La Figura 1 resume el flujo metodológico implementado, que comprende seis etapas principales: adquisición de imágenes RGB, segmentación morfológica, construcción y etiquetado del conjunto de datos, entrenamiento de los modelos, evaluación mediante métricas estandarizadas y selección del modelo con mejor desempeño.

Figura 1.
Esquema experimental comparativo



2.2 Materiales y Herramientas Utilizadas

El entrenamiento y evaluación de los modelos se realizó utilizando una infraestructura basada en computación en la nube, lo que permitió garantizar la disponibilidad de recursos GPU durante todas las fases experimentales. Asimismo, se emplearon herramientas ampliamente utilizadas en la investigación en visión por computadora, lo que favoreció la reproducibilidad del estudio

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID030

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

(Google Colab, Ultralytics y Roboflow). La Tabla 1 describe los distintos recursos utilizados.

Tabla 1
Especificaciones de hardware, software y datos.

Categoría	*Detalle*
Hardware	GPU NVIDIA Tesla T4 (15 GB RAM), Entorno Google Colab
Software	Python 3.x, Ultralytics YOLO, PyTorch, MATLAB, Roboflow
Datasets	Larvas (1,190 imágenes), Adultos (1,749 imágenes)
Fuentes	Kaggle (larvas/adultos) y Roboflow (adultos).

La utilización de GPU NVIDIA Tesla T4 permitió reducir considerablemente los tiempos de entrenamiento, mientras que la integración entre Roboflow y Ultralytics facilitó la administración del conjunto de datos y la estandarización del proceso de entrenamiento (Roboflow, 2024; Ultralytics, 2024).

2.3 Segmentación Morfológica en MATLAB (Ground Truth)

La segmentación morfológica es una de las técnicas clásicas de procesamiento digital de imágenes para separar objetos del fondo mediante operadores matemáticos aplicados a imágenes binarias. Este tipo de procesamiento continúa utilizándose como etapa previa para la generación de máscaras de referencia (ground truth) destinadas al entrenamiento de modelos supervisados (González & Woods, 2018). El proceso consistió en las siguientes etapas: conversión a escala de grises, suavizado mediante filtro Gaussiano, que reduce el ruido de alta frecuencia preservando las estructuras principales de la imagen, favoreciendo posteriormente la detección de bordes mediante operadores diferenciales como Sobel (González & Woods, 2018) mientras que método de Otsu selecciona automáticamente el umbral óptimo maximizando la varianza entre clases, siendo ampliamente utilizado en segmentación automática de imágenes biomédicas y entomológicas (Otsu, 1979), las operaciones morfológicas de cierre permiten eliminar discontinuidades y consolidar regiones conectadas, mejorando la definición de los contornos empleados para la generación de máscaras binarias. Este procedimiento se aplicó tanto a imágenes del género *Aedes aegypti* como *Culex*, generando conjuntos de datos más limpios y consistentes que sirvieron como base para el etiquetado. La Figura 2 muestra la segmentación aplicada a un espécimen representativo del género *Aedes*, de izquierda a derecha: imagen original en escala de grises, detección con Sobel, umbral inicial, cierre morfológico, máscara final y segmentación resultante. Por otra parte, la Figura 3 muestra algunos ejemplos del resultado final de la segmentación de ambas especies.

Figura 2
Segmentación morfológica en MATLAB aplicado a mosquito Aedes

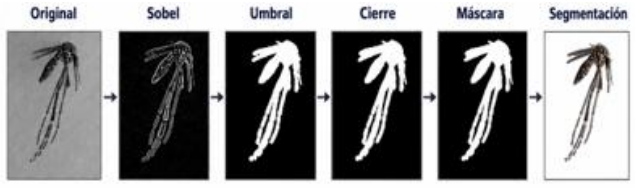


Figura 3
Ejemplos de mosquitos segmentados del tipo Aedes y Culex



2.4 Generación de dataset

La calidad del conjunto de datos es uno de los factores de mayor influencia en el desempeño de los modelos de aprendizaje profundo. Diversos estudios han demostrado que la diversidad en la iluminación, la orientación y la escala favorece la capacidad de generalización en la inferencia (Shorten & Khoshgoftaar, 2019).

El dataset fue gestionado mediante la plataforma Roboflow. El primer conjunto estuvo conformado por 1,190 imágenes de larvas (clases: Larva Aedes *y* Larva Culex*),* mientras que el segundo incluyó 1,749 imágenes de mosquitos adultos (clases: *Aedes* y Culex*).* Las imágenes fueron anotadas mediante la técnica de bounding boxes (cajas delimitadoras), que es el estándar internacional para tareas de detección de objetos, ya que permite localizar espacialmente cada instancia y asociarla con su categoría correspondiente durante el entrenamiento supervisado (Redmon et al., 2016). El etiquetado permitió generar las anotaciones necesarias para el entrenamiento supervisado de los modelos YOLO, lo que facilitó la localización y la clasificación automáticas de los organismos durante la inferencia. Los conjuntos de datos fueron particionados en 70% para entrenamiento, 20% para validación y 10% para prueba. Esta distribución permitió entrenar los modelos y evaluar su desempeño en datos no vistos previamente, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2
Distribución de imágenes por conjunto de datos.

Conjunto de datos	*Entrenamiento*	*Validación*	*Prueba*	*Total*
Larvas	833 (1,041)	238 (99)	119 (50)	1,190
Mosquitos adultos	1,224 (1,530)	350 (146)	175 (73)	1,749

Con el objetivo de incrementar la variabilidad de las muestras y mejorar la capacidad de generalización de los modelos, se aplicaron técnicas de aumento de datos (data augmentation), que reducen el sobreajuste e incrementan la robustez del modelo al simular variaciones presentes durante la adquisición real de imágenes (Shorten & Khoshgoftaar, 2019). En el caso de las larvas, se utilizó una aumentación de ×3 mediante volteos horizontales y verticales, rotaciones de ±9° y variaciones de brillo de ±17 %. Estas transformaciones permitieron simular diferentes orientaciones y condiciones de iluminación presentes durante la captura microscópica de las muestras.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID030

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Para los mosquitos adultos se aplicaron rotaciones de ±15° y ajustes de brillo de ±15 %, excluyendo los volteos horizontales y verticales. Esta decisión se tomó porque la orientación corporal y la disposición anatómica son características relevantes para la diferenciación taxonómica entre especies, por lo que un giro podría alterar patrones morfológicos importantes para el aprendizaje del modelo.

2.5 Entrenamiento de los Modelos

Las arquitecturas YOLO pertenecen a la familia de detectores de una sola etapa (one-stage detectors), caracterizadas por combinar velocidad de inferencia y alta precisión, atributos que las convierten en una alternativa adecuada para aplicaciones de monitoreo en tiempo real (Redmon et al., 2016; Jocher et al., 2024).

El entrenamiento de los modelos se realizó en Python mediante la librería Ultralytics YOLO sobre el entorno de ejecución de Google Colab con aceleración mediante GPU. Se evaluaron las arquitecturas YOLOv8, YOLOv11 y YOLOv26 en sus variantes Nano (n), utilizando pesos preentrenados en formato PyTorch (.pt). Las versiones Nano fueron seleccionadas por presentar una menor complejidad computacional sin comprometer significativamente la precisión, lo cual resulta relevante para futuras implementaciones en plataformas embebidas como Raspberry Pi o NVIDIA Jetson (Ultralytics, 2024). Los conjuntos de datos fueron gestionados con Roboflow y exportados en formato compatible con Ultralytics mediante archivos de configuración YAML. Durante el entrenamiento se mantuvieron condiciones homogéneas en los experimentos, con el objetivo de garantizar una comparación objetiva entre arquitecturas.

La utilización de pesos preentrenados permitió aprovechar las ventajas del aprendizaje por transferencia (transfer learning), una estrategia ampliamente utilizada para acelerar la convergencia y mejorar el desempeño cuando se dispone de conjuntos de datos especializados (Pan & Yang, 2010).

La comparación entre arquitecturas se realizó exactamente bajo las mismas condiciones experimentales, evitando introducir factores externos que pudieran favorecer el desempeño de alguno de los modelos evaluados.

2.6 Evaluación

La evaluación del desempeño se realizó utilizando las métricas recomendadas para problemas de detección de objetos, que permiten evaluar simultáneamente la capacidad de clasificación y la precisión espacial de las detecciones (Everingham et al., 2015).

El desempeño de los modelos fue evaluado mediante cinco métricas estándar de detección de objetos, calculadas automáticamente por la librería Ultralytics durante el proceso de validación.

La Precisión (P), se calcula mediante (1) y mide la proporción de detecciones correctas (verdaderos positivos, TP) sobre el total de detecciones realizadas, penalizando los falsos positivos (FP):

$$\text{Precisión} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (1)$$

El Recall (R), expresado en (2), indica la proporción de objetos reales que el modelo detectó correctamente, penalizando los falsos negativos (FN):

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

El F1-score es la media armónica entre Precisión y Recall, ofreciendo una métrica balanceada (3):

$$\text{F1-score} = 2\frac{P \cdot R}{P+R} \quad (3)$$

La Precisión Promedio (AP), obtenida mediante (4), integra el área bajo la curva Precisión-Recall a través de diferentes umbrales de confianza:

$$\text{AP} = \sum_k (R_k - R_{k-1}) \cdot P_k \quad (4)$$

La media de la Precisión Promedio (mAP), expresada en (5), promedia AP sobre todas las clases *N* del conjunto de datos:

$$\text{mAP} = \frac{1}{N} \cdot \sum AP_i \quad (5)$$

La intersección sobre la unión de objetos (IoU), expresada en (6), determina el grado de superposición entre la caja predicha y el ground truth:

$$\text{IoU} = \frac{\text{Área}(\text{Predicción intersección GT})}{\text{Área}\,(\text{Predicción unión GT})} \quad (6)$$

El IoU constituye el criterio internacional utilizado para determinar el grado de coincidencia entre la predicción del modelo y la anotación de referencia (ground truth), y sirve de base para el cálculo del Average Precision y del mean Average Precision (Everingham et al., 2015).

En el mAP50, el umbral de IoU se fija en 0.50. El mAP50-95 calcula el mAP de forma progresiva a partir de umbrales de IoU desde 0.50 hasta 0.95, con incrementos de 0.05, lo que proporciona una evaluación más rigurosa de la precisión de localización. Esta última métrica se utilizó como criterio principal de comparación entre arquitecturas en el presente estudio. Actualmente, la métrica mAP50-95 se considera el estándar de referencia para comparar arquitecturas de detección de objetos, ya que evalúa simultáneamente la precisión de localización a diferentes niveles de exigencia (Lin et al., 2014; Jocher et al., 2024).

Se evaluaron distintas configuraciones de épocas con el objetivo de analizar la convergencia y desempeño de cada modelo. Para cada versión de YOLO, el entrenamiento se realizó en incrementos de 50 épocas, hasta un máximo de 300 épocas. Durante el proceso, Ultralytics almacenó automáticamente los pesos del mejor modelo obtenido en cada experimento, utilizando como criterio principal la métrica mAP50-95 calculada sobre el conjunto de validación. Los modelos resultantes fueron guardados en formato PyTorch (.pt), lo que permitió posteriormente su evaluación e inferencia para analizar los resultados. El entrenamiento se realizó bajo condiciones homogéneas para asegurar una comparación justa entre arquitecturas, manteniendo constantes parámetros como la resolución de entrada, la configuración de los datos y las métricas de evaluación. Estas métricas fueron calculadas automáticamente mediante la librería Ultralytics YOLO durante el proceso de validación de cada modelo.

La Tabla 3 presenta el desempeño de los modelos YOLOv8, YOLOv11 y YOLOv26 evaluados con diferentes configuraciones del número de épocas durante el entrenamiento. El objetivo de esta comparación es analizar la evolución del rendimiento de cada modelo en función del número de iteraciones e identificar el punto de mejor desempeño.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID030

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Tabla 3
Métricas por época — Modelos YOLO, larvas Aedes y Culex.

Modelo	Épocas	Precisión (%)	Recall (%)	F1-score (%)	mAP50 (%)	mAP50-95 (%)
YOLOv8	50	99.34	100.00	99.67	**99.50**	78.34
YOLOv8	100	99.84	100.00	99.92	**99.50**	79.14
YOLOv8	150	99.84	100.00	99.92	**99.50**	78.84
YOLOv8	250	99.72	100.00	99.86	**99.50**	79.00
YOLOv8	257	98.74	99.06	98.90	99.44	78.60
YOLOv11	50	98.84	100.00	99.41	99.20	79.13
YOLOv11	100	99.79	100.00	99.89	**99.50**	78.73
YOLOv11	150	99.74	100.00	99.87	**99.50**	**80.34**
YOLOv11	200	99.67	100.00	99.83	**99.50**	80.27
YOLOv11	250	99.27	100.00	99.63	**99.50**	79.56
YOLOv11	300	99.54	100.00	99.77	**99.50**	78.79
YOLOv26	50	100.00	99.48	99.74	**99.50**	80.24
YOLOv26	100	99.83	100.00	99.91	**99.50**	79.34
YOLOv26	150	99.85	99.92	99.88	**99.50**	79.51
YOLOv26	200	99.19	100.00	99.59	**99.50**	80.28
YOLOv26	250	99.87	100.00	99.93	**99.50**	79.43
YOLOv26	300	99.69	100.00	99.84	**99.50**	77.55
YOLOv26	350	98.83	100.00	99.41	99.36	78.46
YOLOv26	363	99.76	100.00	99.88	**99.50**	78.26

Nota. Los valores en negrita indican el mejor mAP50-95.

En el caso de YOLOv8, se evaluaron configuraciones de 50 a 257 épocas. Se observa que el modelo alcanza valores elevados de precisión y recall desde etapas tempranas del entrenamiento, manteniendo un recall del 100% en la mayoría de las configuraciones. El mejor desempeño en términos de mAP50-95 se obtuvo alrededor de las 100 épocas, con un valor de 79.14%, lo que indica una convergencia relativamente rápida.

Por su parte, YOLOv11 se evaluó en un rango de 50 a 300 épocas. Este modelo mantiene un comportamiento estable, con valores de precisión cercanos al 99.7% y de recall del 100% en todas las configuraciones. El mejor resultado se obtuvo a las 150 épocas, con un mAP50-95 de 80.34%, lo que representa el valor más alto entre todos los modelos evaluados e indica una mayor capacidad de localización precisa.

En el caso de YOLOv26, se evaluaron configuraciones más extensas, de 50 a 363 épocas. Aunque este modelo alcanza valores altos de precisión e incluso el máximo (100%) en algunas configuraciones, su desempeño en mAP50-95 es más variable. El mejor resultado se obtuvo alrededor de las 200 épocas, con un valor de 80.28%, aunque se observa una ligera disminución del rendimiento en entrenamientos más prolongados, lo que sugiere una posible tendencia al sobreajuste.

En general, los tres modelos presentan un desempeño sobresaliente en términos de mAP50, con valores cercanos al 99.50% en todos los casos, y un recall cercano al 100%, lo que indica una alta capacidad de detección. Sin embargo, la métrica mAP50-95 permite distinguir con mayor precisión el rendimiento real, evidenciando que YOLOv11 ofrece el mejor equilibrio entre precisión y estabilidad durante el entrenamiento. Finalmente, el rendimiento de los modelos se evaluó mediante las métricas de precisión, recall, F1-score, mAP50 y mAP50-95, lo que permitió comparar cuantitativamente las distintas arquitecturas.

Tabla 4
Mejores métricas por modelo — Larvas Aedes y Culex.

Modelo	Épocas	P (%)	R (%)	F1 (%)	mAP50 (%)	mAP50-95 (%)
YOLOv8	100	99.84	100.00	99.92	**99.50**	79.14
YOLOv11	150	99.74	100.00	99.87	**99.50**	**80.34**
YOLOv26	200	99.19	100.00	99.59	**99.50**	80.28

Nota. Mejor resultado por modelo según mAP50-95. Negrita = mejor por columna.

De acuerdo con la Tabla 3, los tres modelos alcanzaron Recall del 100% y mAP50 de 99.50%. YOLOv11 a 150 épocas obtuvo el mayor mAP50-95 con 80.34%, seguido de YOLOv26 (80.28%) y YOLOv8 (79.14%). YOLOv8 destacó por convergencia rápida desde las 100 épocas. YOLOv26 mostró tendencia al sobreajuste en configuraciones superiores a 300 épocas. La Tabla 5 presenta los resultados obtenidos para la detección de mosquitos adultos de los géneros Aedes y Culex, evaluando el desempeño de los modelos YOLOv8, YOLOv11 y YOLOv26 bajo distintas configuraciones de épocas de entrenamiento.

Tabla 5
Métricas de entrenamiento por época — Modelos YOLO, dataset de mosquitos adultos Aedes y Culex.

Modelo	Épocas	Precisión (%)	Recall (%)	F1-score (%)	mAP50 (%)	mAP50-95 (%)
YOLOv8	50	99.88	99.56	99.72	**99.50**	77.07
YOLOv8	100	99.73	98.53	99.13	98.50	76.29
YOLOv8	150	99.76	100.00	99.88	**99.50**	76.48
YOLOv8	174	99.76	98.53	99.14	98.50	75.65
YOLOv8	185	99.77	98.53	99.15	99.42	75.74
YOLOv8	208	99.82	98.53	99.17	98.50	74.90
YOLOv11	50	99.85	100.00	99.92	**99.50**	77.52
YOLOv11	100	99.48	98.53	99.00	98.50	77.07
YOLOv11	150	99.81	98.41	99.10	98.50	**78.63**
YOLOv11	200	99.76	98.53	99.14	98.50	77.44
YOLOv11	250	99.70	98.53	99.11	98.50	78.97
YOLOv11	292	99.44	98.53	98.98	98.50	77.13
YOLOv26	50	98.58	99.55	99.06	**99.50**	78.21
YOLOv26	100	99.23	99.90	99.56	**99.50**	78.38
YOLOv26	150	99.95	98.40	99.17	98.50	77.14
YOLOv26	208	99.47	97.82	98.64	98.50	75.87
YOLOv26	248	98.44	98.17	98.30	98.41	77.61

Los valores en negrita indican el mejor mAP50-95 global. Las líneas separan los grupos por modelo.

Las métricas de entrenamiento evidencian que las tres arquitecturas evaluadas desarrollaron un proceso de aprendizaje estable y consistente para la detección de mosquitos adultos de *Aedes* y *Culex*. En la mayoría de las configuraciones analizadas,

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID030

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

los modelos alcanzaron valores de Precisión y F1-score superiores al 98%, lo que demuestra una elevada capacidad para identificar correctamente los especímenes y mantener un equilibrio adecuado entre falsos positivos y falsos negativos. Asimismo, los valores de mAP50, cercanos al 99.50%, reflejan una alta capacidad de localización bajo un criterio de coincidencia espacial moderado (*IoU = 0.50*).

A diferencia del conjunto de datos de larvas, el recall presentó una ligera disminución, alcanzando un máximo de 98.53%. Este comportamiento puede atribuirse, por una parte, a la mayor complejidad morfológica de los mosquitos adultos, caracterizados por una mayor variabilidad en la orientación, la postura corporal, la escala y la iluminación durante la adquisición de las imágenes. Adicionalmente, el desbalance entre las clases evaluadas en el conjunto de prueba (112 especímenes de *Aedes* frente a 34 de *Culex*), pudo influir parcialmente en la capacidad del modelo para recuperar la totalidad de los individuos presentes, afectando el valor del recall.

La evaluación mediante mAP50-95, considerada una de las métricas más estrictas para comparar modelos de detección de objetos, permitió diferenciar con mayor claridad el desempeño de las arquitecturas evaluadas. En este sentido, de acuerdo con la Tabla 6, YOLOv11 obtuvo el mejor rendimiento, alcanzando un mAP50-95 de 78.97 % tras 250 épocas de entrenamiento, seguido por YOLOv26, con 78.38 % a las 100 épocas, y YOLOv8, con 77.07 % a las 50 épocas. Aunque las diferencias entre los modelos fueron relativamente pequeñas, estos resultados evidencian una mayor estabilidad y capacidad de localización espacial en YOLOv11, mientras que YOLOv8 destacó por alcanzar su desempeño óptimo en un menor número de épocas, lo que refleja una convergencia más rápida y una mayor eficiencia computacional. Por su parte, YOLOv26 presentó un comportamiento competitivo en las primeras etapas del entrenamiento; sin embargo, mostró una mayor variabilidad a medida que aumentaba el número de épocas, lo que sugiere una mayor susceptibilidad al sobreajuste.

Tabla 6

Mejores métricas por modelo — Mosquitos adultos Aedes y Culex.

Modelo	*Épocas*	*P (%)*	*R (%)*	*F1 (%)*	*mAP50 (%)*	*mAP50-95 (%)*
YOLOv8	50	99.88	99.56	99.72	**99.50**	77.07
YOLOv11	250	99.70	98.53	99.11	98.50	**78.97**
YOLOv26	100	99.23	99.90	99.56	**99.50**	78.38

Las métricas obtenidas para el conjunto de mosquitos adultos fueron ligeramente inferiores a las alcanzadas en el conjunto de larvas, lo que confirma que la detección de individuos adultos representa un problema de mayor complejidad debido a la diversidad morfológica y a las condiciones de adquisición de las imágenes. En conjunto, estos resultados indican que las tres arquitecturas constituyen alternativas viables para aplicaciones de vigilancia entomológica automatizada; no obstante, YOLOv11 ofrece el mejor equilibrio entre precisión de detección, capacidad de localización espacial y estabilidad durante el entrenamiento, lo que la consolida como la arquitectura más adecuada para este conjunto de datos.

2.7 Matrices de Confusión

El análisis de las matrices de confusión para YOLOv11 reveló una clasificación perfecta (1.00) en larvas tras 150 épocas, como se muestra en la Figura 4. En el caso de los mosquitos adultos a 250 épocas, el modelo demostró alta robustez, con 112 detecciones correctas de Aedes y 34 de Culex, registrando un solo falso positivo, tal como se observa en la Figura 5.

Figura 4

Matriz de confusión normalizada — YOLOv11, 150 épocas, larvas Aedes y Culex. Valores 1.00 indican clasificación perfecta.

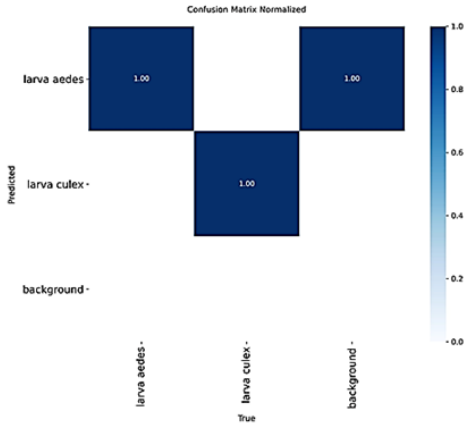
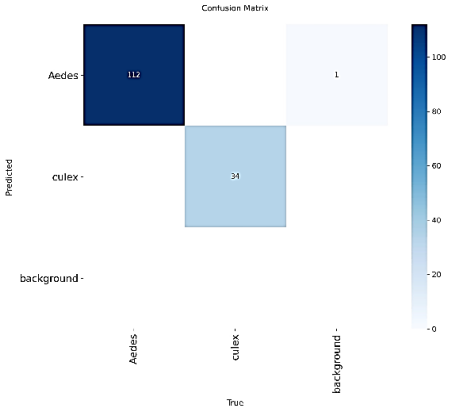


Figura 5

Matriz de confusión absoluta — YOLOv11, 250 épocas, mosquitos adultos Aedes y Culex.



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se observa en las Tablas 3 y 4, las tres arquitecturas alcanzaron un desempeño sobresaliente en la detección de larvas, registrando valores de precisión superiores al 99% y un Recall cercano al 100% en prácticamente todas las configuraciones evaluadas. Estos resultados evidencian que el conjunto de datos empleado permitió un aprendizaje estable e independiente de la arquitectura empleada.

3.1 Detección de Larvas de Aedes y Culex

Se observó que YOLOv8 alcanzó su desempeño óptimo tras 100 épocas de entrenamiento, mientras que YOLOv11 y YOLOv26 requirieron un mayor número de iteraciones para alcanzar su máxima capacidad de detección. Esta convergencia

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

más rápida representa una ventaja desde el punto de vista computacional, ya que reduce el tiempo de entrenamiento y el consumo de recursos, lo que favorece su implementación en escenarios donde la capacidad de procesamiento o la disponibilidad de hardware son limitadas.

3.2 Detección de Mosquitos Adultos

Los resultados obtenidos para el conjunto de datos de mosquitos adultos mostraron un comportamiento consistente con el observado en el conjunto de larvas, aunque con una ligera disminución en las métricas de desempeño. Esta diferencia puede atribuirse a la mayor complejidad morfológica de los especímenes adultos, así como a la variabilidad en su orientación, postura corporal, tamaño aparente y condiciones de iluminación durante la adquisición de las imágenes, factores que incrementan la dificultad del proceso de detección y localización automáticos.

En este escenario, YOLOv11 volvió a mostrar el mejor desempeño global, alcanzando un mAP50-95 de 78.97 %, lo que confirma su estabilidad y capacidad de generalización en ambas tareas de detección. YOLOv26 obtuvo un rendimiento muy cercano (78.38 %), aunque mostró una mayor sensibilidad al incremento del número de épocas de entrenamiento, lo que evidencia una tendencia al sobreajuste en las configuraciones de entrenamiento más prolongadas. Por su parte, YOLOv8 destacó por su rápida convergencia, alcanzando un desempeño competitivo con un menor número de épocas, lo que lo convierte en una alternativa adecuada para aplicaciones en las que el tiempo de entrenamiento y los recursos computacionales constituyen factores limitantes.

Las Figuras 6 a 11 ilustran ejemplos representativos de la capacidad de detección alcanzada por YOLOv11 sobre ambos conjuntos de datos. En todos los casos se observa una adecuada localización espacial de los especímenes mediante cajas delimitadoras, acompañada por elevados niveles de confianza. La ausencia de confusiones entre las clases Aedes y Culex coincide con el comportamiento observado en las matrices de confusión y respalda las métricas cuantitativas obtenidas durante la validación.

Figura 6
Ejemplos de detección del modelo de larvas Aedes y Culex

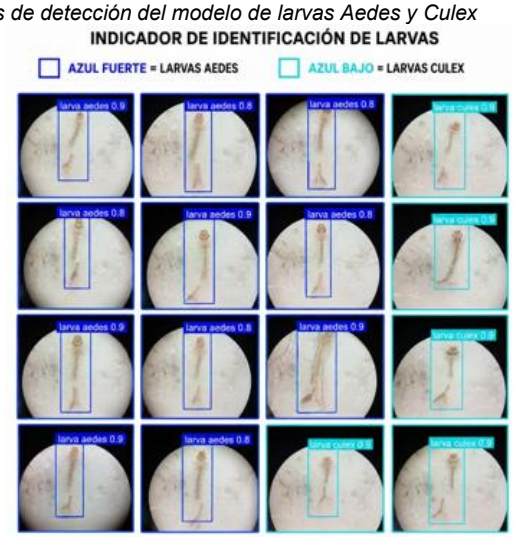


Figura 7
Ejemplos de detección del modelo de mosquitos Aedes y Culex

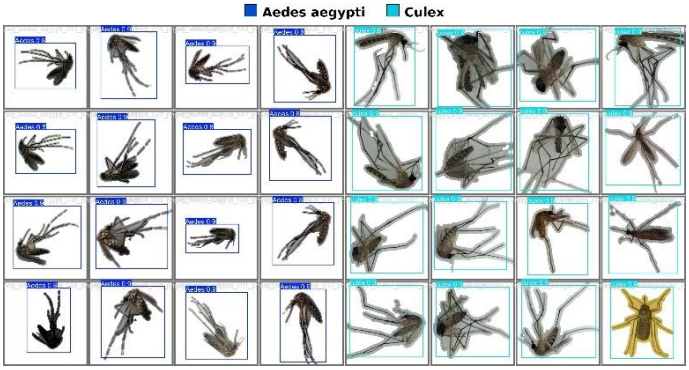


Figura 8
Ejemplo detección con confianza de 0.80

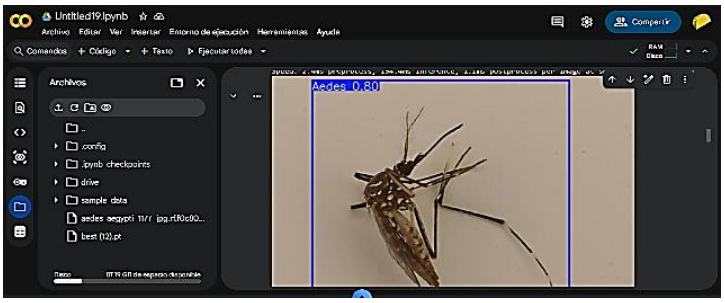


Figura 9
Ejemplo detección con confianza de 0.89

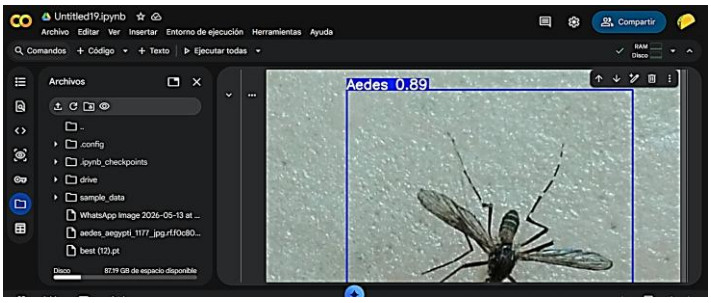


Figura 10.
Ejemplo detección larva Aedes con confianza de 0.74

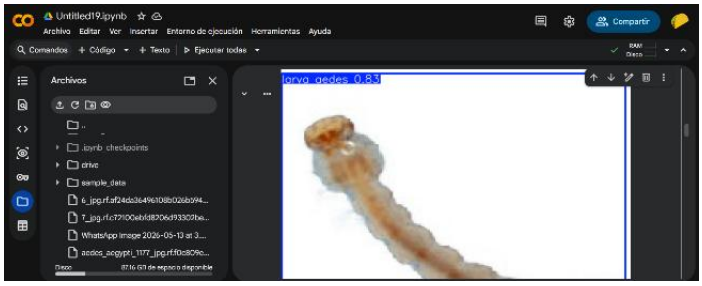


Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID030

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Otro ejemplo de detección de Larva Aedes con confianza de 0.83, se muestra en la Figura 11.

Figura 11
Ejemplo detección larva Aedes con confianza de 0.83



Las diferencias observadas entre los conjuntos de larvas y adultos indican que la etapa biológica del organismo influye directamente sobre el desempeño del modelo.

3.3 Análisis Comparativo General

Los resultados obtenidos evidencian que las tres arquitecturas evaluadas presentan un desempeño altamente competitivo para la detección automática de larvas y mosquitos adultos de Aedes aegypti y Culex. Aunque las diferencias fueron mínimas cuando se analizaron métricas tradicionales como precisión, recall y mAP50, la métrica mAP50-95 permitió identificar diferencias más significativas en la precisión de localización espacial, posicionando de manera consistente a YOLOv11 como el modelo con mejor desempeño global. Este comportamiento confirma que el empleo de mAP50-95 constituye un criterio más riguroso y representativo para comparar arquitecturas modernas de detección de objetos, al evaluar el rendimiento bajo diferentes umbrales de IoU.

En contraste, YOLOv8 destacó por alcanzar una convergencia más rápida, obteniendo resultados competitivos con un menor número de épocas de entrenamiento, lo que representa una alternativa atractiva para aplicaciones con restricciones de tiempo o capacidad computacional. Por su parte, YOLOv26 mostró un desempeño comparable al de YOLOv11 en configuraciones intermedias; sin embargo, presentó una mayor tendencia al sobreajuste durante entrenamientos prolongados, lo que sugiere la necesidad de incorporar estrategias de regularización o criterios de parada temprana (early stopping) para preservar su capacidad de generalización.

El análisis de las matrices de confusión respalda los resultados cuantitativos obtenidos. En el conjunto de datos de larvas, YOLOv11 alcanzó una clasificación perfecta, evidenciando una adecuada separación entre las clases y confirmando tanto la consistencia del proceso de entrenamiento como la calidad del conjunto de datos utilizado. Para el conjunto de mosquitos adultos únicamente se registró un falso positivo, lo que demuestra la robustez del modelo incluso frente a una mayor variabilidad morfológica y condiciones experimentales más complejas.

Los hallazgos obtenidos son consistentes con investigaciones recientes sobre detección automática de insectos mediante arquitecturas YOLO. Al Maruf et al. (2025) reportaron elevados niveles de precisión en la clasificación de especies de mosquitos utilizando modelos basados en aprendizaje profundo, mientras que Duan et al. (2026) demostraron que versiones optimizadas de YOLO pueden mejorar simultáneamente la precisión y la eficiencia computacional. De manera similar, Raza et al. (2026) observaron un desempeño robusto de variantes de YOLO en la detección de larvas bajo diferentes condiciones de adquisición de imágenes. Aunque los valores de mAP50 reportados en estos estudios son, en algunos casos, superiores al 95%, las diferencias pueden atribuirse a la utilización de conjuntos de datos obtenidos en condiciones más controladas y con menor variabilidad ambiental que las consideradas en la presente investigación. En conjunto, los resultados confirman que las tres arquitecturas constituyen alternativas viables para sistemas automatizados de vigilancia entomológica; sin embargo, YOLOv11 ofrece el mejor equilibrio entre precisión de detección, capacidad de localización espacial y estabilidad durante el entrenamiento, lo que la posiciona como la opción más adecuada para futuras implementaciones en plataformas de monitoreo epidemiológico en tiempo real.

IV. CONCLUSIONES

La presente investigación realizó una evaluación comparativa de las arquitecturas YOLOv8, YOLOv11 y YOLOv26 para la detección automática de larvas y mosquitos adultos de Aedes aegypti y Culex, mediante un protocolo experimental homogéneo que garantizó una comparación objetiva entre modelos. Los resultados demostraron que las tres arquitecturas presentan un desempeño sobresaliente para aplicaciones de vigilancia entomológica automatizada, alcanzando valores de precisión superiores al 99 %, un recall cercano al 100% y un mAP50 superior al 98.5 %.

Entre los modelos evaluados, YOLOv11 mostró el mejor equilibrio entre precisión de detección, capacidad de localización espacial y estabilidad durante el entrenamiento, obteniendo los mayores valores de mAP50-95 en ambas tareas: 80.34% para la detección de larvas (150 épocas) y 78.97% para la detección de mosquitos adultos (250 épocas). Aunque las diferencias respecto a YOLOv26 fueron reducidas, los resultados evidencian una mayor capacidad de generalización bajo las condiciones experimentales consideradas. Por su parte, YOLOv8 destacó por alcanzar una convergencia más rápida, logrando su desempeño óptimo entre 50 y 100 épocas, lo que representa una alternativa atractiva cuando se dispone de recursos computacionales limitados. En contraste, YOLOv26 mostró un comportamiento competitivo, aunque con una mayor susceptibilidad al sobreajuste durante entrenamientos prolongados.

Desde una perspectiva aplicada, los hallazgos obtenidos respaldan el uso de modelos basados en aprendizaje profundo como herramientas para fortalecer los programas de vigilancia epidemiológica, al reducir la dependencia de procesos manuales, incrementar la eficiencia en la identificación de vectores y favorecer una respuesta más oportuna ante posibles brotes de enfermedades transmitidas por mosquitos. Asimismo, el protocolo metodológico desarrollado constituye una base sólida para futuras investigaciones orientadas a la detección automática de otros vectores de importancia médica y al desarrollo de sistemas inteligentes para la vigilancia sanitaria.

Como líneas futuras de investigación, se propone implementar YOLOv11 en plataformas embebidas, como Raspberry Pi 5, para el monitoreo en tiempo real bajo condiciones de campo; ampliar el conjunto de datos incorporando un mayor número de especies y escenarios ambientales; evaluar arquitecturas emergentes de

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

detección de objetos; e integrar sistemas de inferencia en tiempo real con infraestructuras IoT y plataformas de vigilancia epidemiológica. Estas acciones contribuirán al desarrollo de soluciones tecnológicas más robustas, escalables y aplicables directamente a programas de salud pública y control vectorial.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación, así como al Instituto Tecnológico de La Laguna, Instituto Tecnológico Superior de Lerdo e Instituto Tecnológico Superior de San Pedro de las Colonias por las facilidades otorgadas para la realización del proyecto. Asimismo, se reconoce el apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el impulso al desarrollo científico y tecnológico.

VI. REFERENCIAS

Al Maruf, A., Mahmudul Haque, M., Ara Rumy, R., Jahan Puspo, J., & Aung, Z. (2025). TransembleNet: Enhancing vector mosquito species classification through transfer learning-based ensemble model. *PLOS ONE, 20*(5), e0322171. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322171

Cremades, R., Sandoval-Pinto, E., Ortega-Prieto, A. M., Jimenez-Guardeño, J. M., Pérez-Gómez, H. R., Lona Reyes, J. C., Sierra-Díaz, E., & Regla-Nava, J. A. (2026). Epidemiological characteristics of dengue disease in Mexico (2014–2025): A descriptive analysis of a hyperendemic country. *Pathogens, 15*(2), 190. https://doi.org/10.3390/pathogens15020190

Duan, J., Liu, L., Ma, D., Kong, M., Wang, S., & Zhu, L. (2026). LW-YOLO: A lightweight enhanced YOLOv8-based model for mosquito detection. *Algorithms, 19*(4), 267. https://doi.org/10.3390/a19040267

Everingham, M., Eslami, S. M. A., Van Gool, L., Williams, C. K. I., Winn, J., & Zisserman, A. (2015). The Pascal Visual Object Classes Challenge: A retrospective. *International Journal of Computer Vision, 111*(1), 98–136. https://doi.org/10.1007/s11263-014-0733-5

González, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing* (4th ed.). Pearson.

Hendriko, V., & Hermanto, D. (2025). Performance comparison of YOLOv10, YOLOv11, and YOLOv12 models on human detection datasets. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence, 5*(1), 440–450. https://doi.org/10.47709/brilliance.v5i1.6447

Hung, G., & Rodríguez, I. F. (2025). A comparative study of YOLOv8 to YOLOv11 performance in underwater vision tasks. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.12682

Javed, N., López-Denman, A. J., Paradkar, P. N., & Bhatti, A. (2023). EggCountAI: A convolutional neural network-based software for counting of *Aedes aegypti* mosquito eggs. *Parasites & Vectors, 16*, 341. https://doi.org/10.1186/s13071-023-05956-1

Jocher, G., Qiu, J., & Chaurasia, A. (2024). *Ultralytics YOLO* (Version 8.2.69) [Computer software]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.13129849

Lin, T.-Y., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., Dollár, P., & Zitnick, C. L. (2014). Microsoft COCO: Common objects in context. In D. Fleet, T. Pajdla, B. Schiele, & T. Tuytelaars (Eds.), *Computer vision – ECCV 2014* (pp. 740–755). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1_48

Mendoza-Cano, O., Danis-Lozano, R., Trujillo, X., Huerta, M., Ríos-Silva, M., Lugo-Radillo, A., Bricio-Barrios, J. A., Benites-Godínez, V., Cuevas-Arellano, H. B., Uribe-Ramos, J. M., Solano-Barajas, R., Cárdenas, Y., Venegas-Ramírez, J., Ríos-Bracamontes, E. F., García-Solórzano, L. A., Camacho-delaCruz, A. A., & Murillo-Zamora, E. (2025). Spatial patterns and clustering of dengue incidence in Mexico: Analysis of Moran's index across 2,471 municipalities from 2022 to 2024. *PLOS ONE, 20*(5), e0324754. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324754

Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9*(1), 62–66. https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076

Pan, S. J., & Yang, Q. (2010). A survey on transfer learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 22*(10), 1345–1359. https://doi.org/10.1109/TKDE.2009.191

Raza, M. U., Kasamsumran, N., Ampol, R., Jariyapan, N., Iba, H., & Pora, W. (2026). Dilated YOLOv8 for blur-robust image classification on the MosquitoLarvae-7400 dataset. *IEEE Access, 14*, 37038–37054. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3667960

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 779–788). IEEE. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91

Roboflow. (2024). *Roboflow platform for computer vision*. https://roboflow.com

Sasmita, H. I., Neoh, K.-B., Yusmalinar, S., Anggraeni, T., Chang, N.-T., Bong, L.-J., Putra, R. E., Sebayang, A., Silalahi, C. N., Tu, W.-C., &

Ahmad, I. (2021). Ovitrap surveillance of dengue vector mosquitoes in Bandung City, West Java Province, Indonesia. *PLOS Neglected Tropical Diseases, 15*(10), e0009896. https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0009896

Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of Big Data, 6*, Article 60. https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0

Ultralytics. (2024). *Ultralytics YOLO documentation*. https://docs.ultralytics.com

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización [Conceptualization]	Edson Raúl Campa Ramírez Luis Amado González Vargas
2	Curación de datos [Data curation]	Noé Alvarado Tovar Silvia Adriana Vidaña Martínez
3	Análisis formal [Formal analysis]	Edson Raúl Campa Ramírez Rubén Hernández Rodríguez
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Noé Alvarado Tovar
5	Investigación [Investigation]	Edson Raúl Campa Ramírez Noé Alvarado Tovar
6	Methodología [Methodology]	Edson Raúl Campa Ramírez Luis Amado González Vargas Rubén Hernández Rodríguez
7	Administración del proyecto [Project administration]	Noé Alvarado Tovar
8	Recursos [Resources]	Rubén Hernández Rodríguez Silvia Adriana Vidaña Martínez
9	Software [Software]	Edson Raúl Campa Ramírez Noé Alvarado Tovar
10	Supervision [Supervision]	Luis Amado González Vargas Rubén Hernández Rodríguez
11	Validación [Validation]	Rubén Hernández Rodríguez Silvia Adriana Vidaña Martínez
12	Visualización [Visualization]	Edson Raúl Campa Ramírez Noé Alvarado Tovar
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Edson Raúl Campa Ramírez Luis Amado González Vargas Noé Alvarado Tovar
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Noé Alvarado Tovar Luis Amado González Vargas Silvia Adriaa Vidaña Martínez

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID030

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Diagnóstico y Mejora del Rendimiento de Equipos de Cómputo en un Laboratorio Escolar: Evidencia Experimental y Percepción Estudiantil en la Escuela Primaria

Diagnosis and Performance Improvement of Computing Equipment in a School Laboratory: Experimental Evidence and Student Perception at Elementary School

Ramírez-Sánchez V.A.[1]; Ojeda-Núñez M.I. [2]✉; Gutiérrez-Montoya J. E.[3]; Jurado-Bichir L.E.[4]; Hernández-Cuevas A.A.[5]

Datos de Adscripción:

[1] Ramírez Sánchez, Víctor Andrés
Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela de Sistemas Unidad Laguna, Torreón Coahuila, México
victorramirez@uadec.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4872-0942

[2] ✉ Ojeda Núñez, Martha Iveth
Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela de Sistemas Unidad Laguna, Torreón Coahuila, México
m.ojeda@uadec.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8312-6343

[3] Gutiérrez Montoya, José Eduardo
Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela de Sistemas Unidad Laguna, Torreón Coahuila, México
jose_gutierrez@uadec.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0460-8327

[4] Jurado Bichir, Lorena Elizabeth
Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela de Sistemas Unidad Laguna, Torreón Coahuila, México
ljuradobichir@uadec.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0122-6853

[5] Hernández Cuevas, Alberto Adrián
Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela de Sistemas Unidad Laguna, Torreón Coahuila, México
hernandez.alberto@uadec.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2324-6281

Resumen - Los laboratorios de cómputo en escuelas públicas mexicanas operan con frecuencia con equipos cuya vida útil supera la década, lo que genera latencias que interrumpen el flujo pedagógico. El presente trabajo evalúa el impacto de aumentar la memoria RAM de 4 GB a 8 GB en un equipo representativo del laboratorio de la Escuela Primaria Luis Donaldo Colosio Murrieta (Coahuila, México). Se empleó una metodología mixta: cuantitativamente, se midieron cuatro indicadores de desempeño —tiempo de arranque, porcentaje de uso de RAM en multitarea, uso del archivo de paginación y tiempo de apertura de aplicaciones— mediante el Administrador de Tareas y el Monitor de Recursos de Windows, aplicando un diseño comparativo antes-después con cinco réplicas por indicador bajo condiciones controladas; cualitativamente, se administró una encuesta estructurada de 18 reactivos a 49 alumnos de quinto y sexto grado. Los registros cuantitativos arrojan una reducción del tiempo de arranque de 97.2 a 58.0 segundos (40.2 %), una caída en la ocupación de RAM del 95 % al 54 % durante la multitarea, una contracción del 96.1 % en el uso del archivo de paginación y un acortamiento del tiempo de apertura de aplicaciones de 18.3 a 7.1 segundos (61.2 %). Del lado cualitativo, el 79.6 % de los estudiantes manifestó una actitud favorable hacia el aprendizaje mediado por computadora, y la lentitud de los equipos emergió como la principal barrera en las respuestas abiertas. Los resultados demuestran que una actualización puntual de hardware produce beneficios mensurables que justifican su implementación en contextos educativos con recursos limitados.

Palabras Clave: Aula de cómputo, Educación primaria, Evaluación de rendimiento, Memoria RAM, Optimización de hardware.

***Abstract* - Computing laboratories in Mexican public schools frequently operate with hardware whose service life exceeds ten years, generating operational latencies that disrupt the pedagogical flow. This study evaluates the impact of expanding RAM from 4 GB to 8 GB in a representative workstation at Luis Donaldo Colosio Murrieta Elementary School (Coahuila, México). A mixed methodology was applied: quantitatively, four performance indicators were measured—startup time, RAM usage percentage during multitasking, paging file usage, and application loading time—using the Windows Task Manager and Resource Monitor, under a controlled before-after comparative design with five replications per indicator; qualitatively, a structured 18-item survey was administered to 49 fifth- and sixth-grade students. Quantitative results show a reduction in startup time from 97.2 to 58.0 seconds (40.2 %), a drop in RAM occupancy from 95 % to 54 % during multitasking, a 96.1 % contraction in paging file usage, and a decrease in application loading time from 18.3 to 7.1 seconds (61.2 %). Qualitatively, 79.6% of students expressed a positive attitude toward computer-mediated learning, and equipment sluggishness emerged as the main barrier in open-ended responses. The results show that a targeted hardware upgrade yields measurable benefits that justify adoption in budget-constrained educational settings.**

Keywords: Computer lab, Elementary education, Hardware optimization, Performance evaluation, RAM upgrade.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID031

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

I. INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de brecha digital en el contexto latinoamericano, el debate suele concentrarse en el acceso a dispositivos y conectividad; sin embargo, un eje igualmente crítico —y con frecuencia subestimado— es la calidad funcional de los equipos disponibles en los planteles educativos. Una computadora técnicamente obsoleta, que se bloquea en mitad de una actividad o tarda casi dos minutos en mostrar el escritorio, no constituye una herramienta pedagógica efectiva, aun cuando físicamente exista en el aula. Esta dimensión del problema es el punto de partida del presente trabajo.

La literatura especializada ha documentado ampliamente la relación entre el acceso a la tecnología computacional y los resultados de aprendizaje. Clasuer y Schuwirth (2011) señalan que la evaluación mediada por computadora requiere equipos que respondan de forma fluida para no introducir variables ajenas al desempeño del estudiante. En la misma línea, Petri y von Wangenheim (2017) advierten que la experiencia del usuario con el hardware incide directamente en su disposición y capacidad para interactuar con contenidos digitales de naturaleza educativa. Por su parte, Battle (1999) estableció una correlación positiva entre la disponibilidad de computadoras funcionales y el rendimiento escolar, un argumento que cobra especial relevancia cuando se trata de instituciones en las que el laboratorio escolar es el único punto de contacto de los alumnos con hardware de escritorio.

La administración y sostenibilidad de los centros de cómputo en instituciones educativas ha sido objeto de análisis desde distintas perspectivas. Gálvez Sinibaldi (1997) identificó, en el contexto centroamericano, que la ausencia de modelos administrativos formales en los laboratorios escolares conduce inevitablemente al deterioro progresivo de la infraestructura, ya que las decisiones de mantenimiento se toman de manera reactiva en lugar de preventiva. Esta observación sigue siendo pertinente décadas después: Macas Romero (2019) documentó que los centros de cómputo de las unidades educativas en Ecuador presentan patrones análogos de degradación, en los que la falta de diagnósticos periódicos impide detectar cuellos de botella de hardware antes de que afecten el ambiente de aprendizaje. Venegas y de Jesús (2010) plantean que la distinción entre mantenimiento preventivo y correctivo es determinante para la longevidad funcional de los equipos; cuando las instituciones operan exclusivamente en modo correctivo —interviniendo solo ante fallas visibles— los costos acumulados superan con el tiempo a los de una política de actualización selectiva y planificada. En síntesis, la literatura converge en señalar que gestionar adecuadamente un laboratorio de cómputo no es una tarea exclusivamente tecnológica, sino también una tarea organizacional.

Desde la perspectiva técnica, la evaluación de rendimiento de sistemas computacionales constituye una disciplina con décadas de desarrollo. Heidelberger y Lavenberg (1984) sentaron las bases metodológicas del área, mientras que Fortier y Michel (2003) extendieron esos marcos a la predicción y al análisis comparativo de configuraciones. La memoria de acceso aleatorio (RAM) ocupa en esa tradición un lugar protagónico: Anacker y Wang (1967) demostraron que la estructura jerárquica de la memoria tiene consecuencias directas sobre la eficiencia global del sistema. Cuando la RAM resulta insuficiente, el sistema operativo activa el mecanismo de paginación, transfiriendo bloques de datos entre la RAM y el disco duro; dado que un disco mecánico convencional opera entre 50 y 100 veces más lento que la RAM, esa compensación introduce latencias perceptibles incluso para usuarios no técnicos.

La medición sistemática del rendimiento computacional ha evolucionado hacia plataformas cada vez más sofisticadas. Lucas (1971) sentó las bases conceptuales de la monitorización continua de sistemas, argumentando que la evaluación del desempeño no debe limitarse a momentos de crisis sino integrarse como práctica permanente. Desde ese enfoque seminal, la instrumentación ha avanzado considerablemente: Krishnaswamy y Scherson (2000) propusieron marcos de referencia basados en conjuntos de benchmarks estandarizados que permiten comparar configuraciones de hardware de manera replicable y objetiva, mientras que Vetter et al. (2005) extendieron esos principios hacia entornos de cómputo de alto rendimiento. En el extremo más contemporáneo de este espectro, Sierra Forero (s.f.) desarrolló un sistema modular para la adquisición, gestión y visualización web de métricas de desempeño aplicado al centro de cómputo de alto rendimiento CECAD, demostrando que la recopilación automatizada e integrada de indicadores técnicos —uso de CPU, memoria, red y almacenamiento— permite a los administradores anticipar degradaciones de rendimiento y tomar decisiones de actualización basadas en evidencia, en lugar de operar de manera intuitiva. Aunque el contexto de ese sistema es un entorno de supercómputo universitario, el principio subyacente es igualmente aplicable a escala reducida en laboratorios escolares: contar con métricas concretas y registradas es condición necesaria para justificar cualquier intervención de hardware ante las autoridades institucionales.

La convergencia entre estas dos líneas de trabajo —la pedagógica y la técnica— apunta a una necesidad concreta: los laboratorios escolares requieren tanto un modelo de gestión que contemple ciclos de evaluación periódica como un conjunto mínimo de indicadores cuantitativos que permita diagnosticar el estado real de los equipos. Hernández Brito (2011) subraya que, incluso en ausencia de presupuesto para una renovación integral, estrategias de actualización selectiva de componentes críticos —como la memoria RAM o el almacenamiento— pueden prolongar significativamente la vida útil funcional de un equipo y reducir los costos operativos totales. Esta perspectiva resulta especialmente relevante en el contexto de la educación pública mexicana, donde los recursos asignados al mantenimiento tecnológico suelen ser limitados y las decisiones de inversión deben sustentarse en evidencia cuantificable. Es precisamente en ese espacio —entre la necesidad pedagógica, la restricción presupuestal y la posibilidad técnica— donde se sitúa el presente caso de estudio.

La gestión de los centros de cómputo en entornos escolares ha sido abordada desde distintos ángulos. Gálvez Sinibaldi (1997) propuso modelos administrativos centrados en la eficiencia y la sostenibilidad presupuestal; Macas Romero (2019) documentó el deterioro progresivo de la infraestructura tecnológica en unidades educativas ante la ausencia de actualizaciones periódicas; y Venegas y de Jesús (2010) destacaron que el mantenimiento selectivo de componentes resulta más rentable que la sustitución integral de equipos. Este conjunto de antecedentes constituye el marco teórico desde el cual el presente estudio diseña su intervención.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID031

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

El caso de estudio se sitúa en el laboratorio de cómputo de la Escuela Primaria Luis Donaldo Colosio Murrieta (turno vespertino), Torreón, Coahuila. Los equipos del aula presentaban un deterioro funcional manifiesto: arranques lentos, congelamientos recurrentes y una respuesta deficiente ante la ejecución simultánea de más de una aplicación. Ante la imposibilidad presupuestal de adquirir hardware nuevo, se planteó una intervención mínima —duplicar la capacidad de RAM— y medir su efecto mediante un protocolo de comparación antes-después con indicadores cuantitativos precisos. Como complemento, se aplicó una encuesta a 49 alumnos de quinto y sexto grado para documentar la percepción estudiantil sobre el uso de la tecnología en el aula y contrastarla con los hallazgos técnicos.

El artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección II detalla el diseño experimental, los indicadores de desempeño seleccionados y el instrumento de encuesta; la Sección III presenta los resultados, tanto cuantitativos como cualitativos, con su análisis e interpretación; la Sección IV expone las conclusiones y las recomendaciones derivadas del estudio.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Caracterización del entorno y del problema

El laboratorio de la Escuela Primaria Luis Donaldo Colosio Murrieta cuenta con veinte estaciones de trabajo de escritorio con las siguientes especificaciones: procesador Intel Core i3-2120 a 3.30 GHz, disco duro mecánico de 500 GB a 5 400 rpm, tarjeta gráfica integrada y sistema operativo Windows 10 de 64 bits. Al inicio del diagnóstico, cada equipo disponía de 4 GB de RAM DDR3 a 1 333 MHz. La observación directa y el registro de incidencias reportados por el docente titular del laboratorio revelaron tres indicios recurrentes: (a) tiempos de arranque que superaban los noventa segundos con frecuencia; (b) bloqueos temporales al abrir un segundo o tercer programa durante la sesión; y (c) actividad intensa y sostenida del disco duro, el cual se podía detectar por el ruido que producía y se podía comprobar mediante el indicador del Administrador de Tareas, incluso cuando el usuario no ejecutaba operaciones de lectura o escritura explícitas.

Este tercer síntoma es técnicamente relevante: indica que el sistema operativo estaba empleando el archivo de paginación como extensión de la memoria RAM —una condición conocida en la literatura como thrashing cuando alcanza cierta intensidad (Lucas, 1971)—, lo que degrada el rendimiento de manera exponencial en equipos con discos mecánicos.

2.2 Hipótesis y diseño comparativo

La hipótesis de trabajo estableció que ampliar la memoria RAM de 4 GB a 8 GB produciría: (1) una reducción estadísticamente significativa en el tiempo de arranque del sistema, (2) una disminución en el porcentaje de ocupación de la RAM durante la ejecución simultánea de aplicaciones educativas típicas, y (3) una disminución significativa en el uso del archivo de paginación, con el consiguiente alivio de la carga sobre el disco duro. Se adoptó un diseño cuasi-experimental de tipo antes-después (pre-test/post-test) con un único equipo seleccionado como unidad de análisis por su representatividad respecto al estado general del aula considerando que las características de los equipos son las mismas. Las variables independientes fueron la configuración de la memoria RAM (4 GB vs. 8 GB); las variables dependientes, los tres indicadores mencionados, junto con el tiempo de apertura promedio de las aplicaciones.

Para controlar variables externas o distintas a las que se tomaron en cuenta, las mediciones de ambas fases se efectuaron: con la misma cuenta de usuario de Windows (sin personalización adicional), en el mismo horario (entre las 15:00 y las 16:00 h), con la misma lista de aplicaciones instaladas, y sin actualizaciones pendientes ni procesos programados activos.

Entre la desinstalación de la memoria de 4 GB y la instalación del módulo de 8 GB, el equipo permaneció apagado durante al menos treinta minutos para garantizar la estabilidad térmica. Esto es vital para evitar fallos del sistema, proteger la integridad de los datos y asegurar un rendimiento óptimo ya que el sobrecalentamiento puede distorsionar las señales eléctricas dentro de los chips de memoria, lo que puede generar corrupción en los datos.

2.3 Indicadores y procedimiento de medición

Se definieron cuatro indicadores cuantitativos:

- *I1 — Tiempo de arranque del sistema operativo (segundos):* lapso desde el encendido hasta que el escritorio de Windows quedó completamente
- disponible para la interacción del usuario, confirmado por la desaparición del cursor giratorio. Se realizaron cinco mediciones por fase; se descartaron el valor más alto y el más bajo, y se promedió el trío central.

Figura 1

Inicio de Windows 10

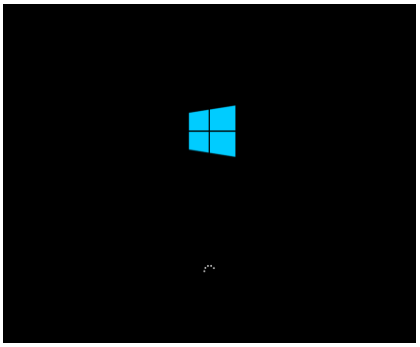
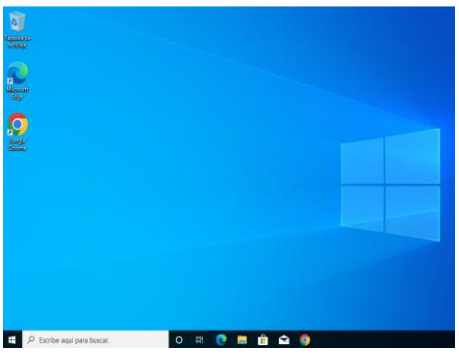


Figura 2

Windows 10 iniciado



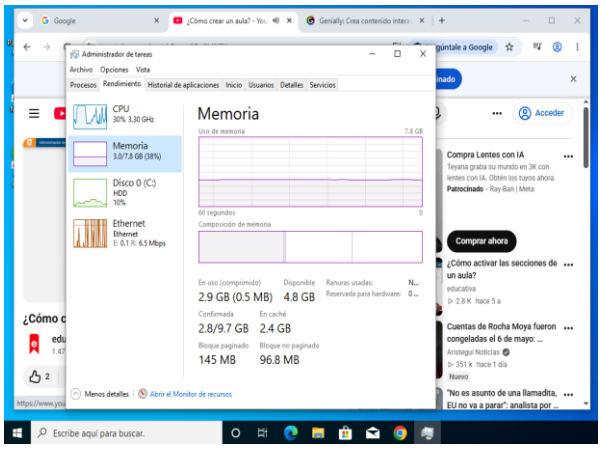
Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID031

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

- *I2 — Porcentaje de uso de RAM en multitarea* (%): valor registrado en la pestaña "Rendimiento" del Administrador de Tareas tras abrir simultáneamente Google Chrome (tres pestañas: buscador, YouTube educativo y Genially), Microsoft Word (documento en edición) y Windows Media Player (video local en reproducción). Se tomaron tres muestras por fase con intervalo de cinco minutos.

Figura 3

Uso de memoria RAM en multitarea



- *I3 — Uso activo del archivo de paginación (MB):* tamaño del conjunto de trabajo paginado reportado por el monitor de recursos de Windows durante la misma sesión de multitarea descrita en I2.

- *I4 — Tiempo promedio de apertura de aplicaciones (segundos):* promedio del tiempo transcurrido desde el doble clic hasta la pantalla operativa de Chrome, Word y Windows Media Player, medido individualmente en arranque en frío (primer lanzamiento tras un reinicio). Se realizaron tres mediciones por aplicación por fase.

Tabla 1

Especificaciones técnicas de la unidad de análisis en ambas fases del experimento.

Componente	**Fase A — 4 GB RAM**	**Fase B — 8 GB RAM**
Procesador	Intel Core i3-2120 @ 3.30 GHz	Sin cambio
Memoria RAM	4 GB DDR3 1333 MHz (1 módulo)	8 GB DDR3 1333 MHz (2 módulos)
Disco de almacenamiento	HDD 500 GB, 5 400 rpm	Sin cambio
Sistema operativo	Windows 10 Pro 64-bit (22H2)	Sin cambio
Archivo de paginación	Automático (gestionado por SO)	Sin cambio
Costo de intervención	—	≈ $350 MXN (~$18 USD) por módulo

2.4 Instrumento de encuesta estudiantil

Simultáneamente con las pruebas de hardware, se diseñó una encuesta estructurada orientada a captar tres dimensiones de la experiencia del alumnado: (a) acceso y disposición tecnológica en el hogar, (b) modalidad y frecuencia de uso de las computadoras en el aula, y (c) percepción subjetiva del aprendizaje mediado por la tecnología. El instrumento constó de 18 reactivos de opción múltiple y 2 preguntas abiertas de respuesta corta; fue administrado en formato digital mediante Google Forms durante junio de 2025. Participó la totalidad de los alumnos presentes en las aulas de quinto grado (n = 24) y de sexto grado (n = 25), lo que permitió una muestra completa de 49 estudiantes, con una distribución de género equilibrada (51.0 % femenino, 49.0 % masculino).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Desempeño cuantitativo del hardware

La Tabla 2 presenta los valores promedio obtenidos para cada indicador en ambas fases, junto con la magnitud del cambio registrado. Las diferencias observadas superan con creces el umbral de variabilidad natural estimado a partir de las mediciones de control.

Tabla 2

Resultados comparativos de los cuatro indicadores de rendimiento entre las configuraciones de 4 GB y 8 GB de RAM.

Indicador	***Fase A (4 GB)***	***Fase B (8 GB)***	***Variación***
I1 – Tiempo de arranque (s)	97.2 s	58.0 s	−39.2 s (−40.2 %)
I2 – Uso de RAM en multitarea (%)	95 %	54 %	−41 p.p.
I3 – Archivo de paginación activo (MB)	≈ 1,240 MB	≈ 48 MB	−96.1 %
I4 – Apertura de aplicaciones* (s)	18.3 s	7.1 s	−11.2 s (−61.2 %)

** Promedio de Chrome, Word y Windows Media Player en arranque en frío.*

El indicador I1 es el de mayor impacto pedagógico directo. Tomando como referencia una sesión de 50 minutos, el tiempo perdido en el arranque colectivo de los equipos pasaría de aproximadamente 3.2 minutos a 1.9 minutos por equipo; en un laboratorio de veinte unidades operadas de forma simultánea, esto significa recuperar hasta 26 minutos-equipo de actividad efectiva por sesión, lo que equivale a multiplicar por décadas el efecto si se considera el ciclo escolar completo.

El indicador I2 merece un análisis especial porque explica causalmente el comportamiento de los demás indicadores. Con 4 GB de RAM y el sistema operativo Windows 10 consumiendo en reposo entre 1.8 y 2.2 GB, abrir tres aplicaciones educativas moderadas bastaba para llevar la memoria RAM al 95 % de ocupación. En ese umbral, el sistema operativo recurre intensamente al mecanismo de paginación —traslada bloques de datos desde la memoria RAM al disco duro y los recupera a medida que se solicitan—. Dado que los discos mecánicos operan con tiempos de acceso del orden de los milisegundos (3–10 ms), frente a los nanosegundos de la memoria RAM, la degradación del rendimiento percibido es radical. Fortier y Michel

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID031

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

(2003) describen este fenómeno como el principal cuello de botella en sistemas con jerarquías de memoria desbalanceadas, conclusión que los datos de este caso ilustran con nitidez.

Con 8 GB de memoria RAM, la ocupación se estabilizó en el 54 % en el mismo escenario de multitarea, lo que deja un margen operativo de casi el 46 % para procesos adicionales del sistema. El archivo de paginación, que registraba 1,240 MB activos en la Fase A, se contrajo a apenas 48 MB en la Fase B —una reducción del 96.1 %—, lo que equivale a su desaparición práctica como factor limitante. Este hallazgo es congruente con lo reportado por Anacker y Wang (1967) sobre el papel de las jerarquías de memoria en la eficiencia global de los sistemas computacionales.

El indicador I4 —tiempo de apertura de aplicaciones— captura el efecto de los tres anteriores desde la perspectiva del usuario final: la apertura de una aplicación desde disco requiere escrituras y lecturas de memoria RAM; si la memoria RAM está saturada y el sistema debe desalojar otras páginas al disco para alojar las nuevas, el proceso depende de la velocidad del almacenamiento secundario. Al eliminar esa dependencia, el tiempo de apertura se redujo un 61.2 %, pasando de 18.3 a 7.1 segundos.

3.2 Percepción estudiantil: resultados de la encuesta

La Tabla 3 sintetiza los resultados de los reactivos más relevantes del instrumento de encuesta. Los porcentajes han sido redondeados al décimo más próximo.

Tabla 3

Distribución de respuestas en los reactivos clave de la encuesta aplicada a 49 estudiantes (n = 49).

Reactivo	Categoría de respuesta principal	Porcentaje
¿Cuentas con computadora o tableta en casa?	Sí	75.5 %
¿Tu hogar tiene acceso a internet?	Sí, de manera continua	81.6 %
¿Usan computadoras en el salón de clases?	Sí, con cierta frecuencia	42.9 %
¿Usan computadoras, pero raramente o nunca?	Casi nunca / Nunca	51.0 %
¿Te gusta aprender con computadora? (favorable)	Me gusta mucho + un poco	79.6 %
¿Aprendes más rápido con computadora? (afirmativo)	Sí, mucho/un poco más	75.5 %
¿Consideras importante usar computadoras para aprender?	Importante + muy importante	67.4 %
Preferencia de trabajo escolar con computadora (exclusivo o mixto)	Computadora sola o con libros	73.5 %
Reglas claras sobre uso de tecnología en el hogar	Sí, reglas definidas	42.9 %
Tiempo diario de uso en casa ≥ 1 hora	1–2 h o más de 2 h	79.6 %

Varios hallazgos de la encuesta merecen atención particular. En primer lugar, el 75.5 % de los alumnos declaró tener acceso a algún dispositivo en casa, pero el análisis detallado de tipo de equipo revela que el dispositivo predominante es el teléfono celular de un adulto del hogar, no una computadora de escritorio. Esto refuerza el papel del laboratorio escolar como espacio donde los alumnos adquieren competencias en el uso de hardware convencional —teclado, ratón, monitor—, lo que hace que la calidad funcional de esos equipos sea determinante para su formación.

En segundo lugar, el 51.0 % de los encuestados reportó que en su salón de clases utilizan computadoras raramente o nunca, lo cual contrasta con el dato de infraestructura (el laboratorio existe y cuenta con equipos). La explicación más lógica, reforzada por las respuestas abiertas, es que la lentitud de los equipos desalienta su uso frecuente: expresiones como "que tarda en entrar", "se traba todo" y "que tarde mucho en cargar" aparecen de manera recurrente como la principal dificultad señalada. Esta relación entre la deficiencia técnica y la reducción del uso pedagógico es coherente con lo documentado por Macas Romero (2019) en unidades educativas con infraestructura tecnológica deteriorada.

En tercer lugar, el 79.6 % de los estudiantes manifestó una actitud positiva hacia el aprendizaje con computadora (suma de las categorías "me gusta mucho" y "me gusta un poco"), y el 75.5 % percibió que aprende igual o mejor con apoyo tecnológico. Estos porcentajes sugieren una disposición favorable que el entorno técnico actual no aprovecha plenamente. Russell (1999) ya advertía que la actitud del estudiante hacia la tecnología como herramienta de evaluación y aprendizaje depende en buena medida de la confiabilidad del equipo disponible; equipos lentos o inestables pueden generar aversión tecnológica donde existía una predisposición positiva.

La triangulación entre ambas fuentes de datos —indicadores técnicos y encuesta estudiantil— ofrece una visión integral del problema y su solución. La mejora considerable en el hardware (reducción del tiempo de arranque, eliminación del thrashing de disco y apertura más rápida de aplicaciones) aborda directamente la barrera que los propios alumnos identificaron como la principal limitación para el uso efectivo del laboratorio.

3.3 Análisis de viabilidad económica

El costo del módulo adicional de RAM DDR3 de 4 GB en el mercado de segunda mano de la región ronda los 350 pesos mexicanos por unidad. Aplicar la mejora a los veinte equipos del laboratorio representaría una inversión total aproximada de $7,000 pesos (alrededor de 360 dólares estadounidenses al tipo de cambio vigente en 2025), sin incurrir en gastos de mano de obra especializada dado que la instalación de memoria RAM es una tarea de mantenimiento básico documentada por Venegas y de Jesús (2010). En contraste, la adquisición de un equipo de

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

escritorio nuevo de gama media oscila entre $12,000 y $18,000 pesos, lo que significa que la intervención propuesta cuesta entre 39 y 58 veces menos que la renovación de todos los equipos del laboratorio. Hernández Brito (2011) plantea que estrategias de actualización selectiva permiten extender la vida útil funcional del hardware entre tres y cinco años adicionales, tiempo más que suficiente para justificar la inversión y planificar una renovación ordenada.

Esta dimensión económica tiene particular importancia en el contexto de la educación pública mexicana, donde los presupuestos de mantenimiento tecnológico son habitualmente escasos y las decisiones de inversión deben rendir cuenta de un impacto por peso gastado claramente demostrable. Los datos de este estudio proveen precisamente ese respaldo empírico.

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo partió de una pregunta práctica - ¿puede una actualización mínima de hardware transformar el rendimiento de equipos de cómputo envejecidos en un entorno educativo? - y la respondió con evidencia cuantitativa precisa. Los cuatro indicadores de desempeño medidos mostraron mejoras de entre el 40 % y el 96 % tras duplicar la capacidad de memoria RAM, y las respuestas abiertas de la encuesta estudiantil confirmaron que la lentitud de los equipos era el problema más percibido y mencionado por los usuarios finales.

Desde el plano técnico, el hallazgo más significativo es la práctica desaparición del archivo de paginación como mecanismo operativo activo: con 4 GB, el sistema destinaba más de 1,200 MB a memoria virtual sobre disco; con 8 GB, ese valor cayó a 48 MB. Esa diferencia explica, de manera suficiente y sin necesidad de cambios adicionales, la aceleración observada en el arranque, la multitarea y la apertura de aplicaciones.

Desde el plano pedagógico, los minutos recuperados en cada sesión y la eliminación de los bloqueos que interrumpían el trabajo de los alumnos constituyen ganancias reales en tiempo efectivo de clase. Una inversión de 350 pesos por equipo, que se traduce en un laboratorio funcional durante potencialmente tres a cinco años adicionales, representa una relación costo-beneficio difícilmente igualable por cualquier otra intervención de infraestructura tecnológica.

Como líneas de trabajo futuro se identifican tres direcciones prioritarias:

1.- Extender el protocolo de medición a todos los equipos del laboratorio para construir una línea base institucional con benchmarks estandarizados ya que el presente estudio empleó un único equipo representativo como unidad de análisis, decisión justificada por la homogeneidad de las especificaciones del laboratorio y por las restricciones operativas de la intervención. Sin embargo, la variabilidad entre unidades individuales —diferencias en el desgaste físico de los módulos de RAM, fragmentación acumulada del disco, historial de actualizaciones del sistema operativo o temperatura de operación— puede introducir dispersión en los resultados que este diseño no captura. Una segunda fase del proyecto debería replicar el protocolo de medición en los veinte equipos del aula, registrando los cuatro indicadores definidos (I1–I4) bajo las mismas condiciones controladas. Con ese conjunto de datos sería posible construir una línea base institucional expresada como distribuciones de valores en lugar de promedios puntuales, identificar los equipos con peor desempeño relativo que requieren intervención prioritaria y calcular benchmarks comparables con los reportados en la literatura sobre evaluación de rendimiento (Krishnaswamy & Scherson, 2000; Vetter et al., 2005). Esta línea base también serviría como punto de referencia para evaluar el deterioro futuro de los equipos y planificar ciclos de mantenimiento preventivo, en línea con las recomendaciones de Sierra Forero (s.f.) sobre la monitorización continua como herramienta de gestión.

2.- Combinar la ampliación de memoria RAM con la sustitución del disco mecánico por una unidad de estado sólido (SSD), cuyo impacto en los tiempos de arranque y apertura de aplicaciones podría ser aún más pronunciado ya que los datos obtenidos en este estudio muestran que la RAM fue el cuello de botella dominante en la configuración de 4 GB; eliminarlo redujo el tiempo de arranque un 40.2 % y el de apertura de aplicaciones un 61.2 %. No obstante, ambos indicadores siguen siendo dependientes de la velocidad de lectura del disco duro, que, con sus 5 400 rpm, presenta tasas de transferencia secuencial de entre 80 y 120 MB/s, muy inferiores a los 500–550 MB/s que ofrece una unidad SSD SATA de gama de entrada —disponible en el mercado local por aproximadamente 400–600 pesos mexicanos en capacidades de 120 a 240 GB—. La literatura técnica documenta que la combinación de RAM suficiente y almacenamiento en estado sólido produce efectos sinérgicos: la RAM elimina la paginación en condiciones normales de uso, mientras que el SSD reduce drásticamente los tiempos de carga inicial de aplicaciones y del propio sistema operativo, que involucran transferencias masivas desde el almacenamiento secundario que ninguna cantidad de RAM puede evitar por completo (Fortier & Michel, 2003). Una intervención combinada RAM+SSD en los equipos del laboratorio —con un costo total estimado de entre 750 y 950 pesos por unidad— podría reducir el tiempo de arranque a menos de 20 segundos, transformando cualitativamente la experiencia de inicio de sesión en cada clase. Se recomienda diseñar esta segunda intervención como un experimento de dos factores que permita desagregar la contribución independiente y conjunta de cada componente, aportando así evidencia más granular a la literatura sobre la optimización del hardware en entornos educativos.

3.- Diseñar un seguimiento longitudinal del desempeño académico de los alumnos durante un ciclo escolar con equipos optimizados, para vincular la mejora técnica con indicadores de aprendizaje medibles. La presente investigación demuestra que la mejora del hardware es técnicamente efectiva y perceptible para los alumnos, pero no establece un vínculo causal entre dicha mejora y el aprendizaje medido. Cerrar esa brecha constituye la línea de trabajo con mayor potencial de impacto científico y político. Se propone diseñar un estudio cuasi-experimental de alcance longitudinal que abarque un ciclo escolar completo, en el que un grupo de alumnos trabaje con los equipos optimizados y un grupo de comparación lo haga en condiciones equivalentes, pero sin intervención de hardware. Las variables de resultado podrían incluir calificaciones en la asignatura de Tecnología, tasas de finalización de actividades en el laboratorio, tiempo efectivo de trabajo registrado por el docente y resultados en pruebas estandarizadas aplicadas en entorno digital. Este diseño permitiría responder preguntas que el presente trabajo deja abiertas: ¿los alumnos que disponen de equipos más ágiles completan más actividades por sesión? ¿La reducción de interrupciones técnicas se traduce en mayor concentración y menor frustración reportada? ¿El efecto varía

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID031

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

según el grado escolar o el nivel de familiaridad previa con la tecnología? Battle (1999) estableció correlaciones entre disponibilidad tecnológica y rendimiento escolar, y Petri y von Wangenheim (2017) subrayaron la importancia de evaluar la experiencia de aprendizaje en entornos digitales; un seguimiento longitudinal en este laboratorio permitiría aportar evidencia local y contextualizada a ese cuerpo de conocimiento, generando datos relevantes para la toma de decisiones de política educativa en el nivel municipal y estatal.

V. AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de esta investigación fue posible gracias a la disposición y apertura de las autoridades, docentes y alumnado de la Escuela Primaria Luis Donaldo Colosio Murrieta (turno vespertino), quienes facilitaron el acceso al laboratorio de cómputo y la aplicación de los instrumentos de recolección de datos en un ambiente de colaboración genuina. Su participación no se limitó a permitir el acceso físico al espacio: la información compartida por el docente titular del laboratorio sobre los síntomas recurrentes de los equipos fue determinante para orientar el diagnóstico inicial y definir los indicadores de medición más pertinentes.

También queremos agradecer a la Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela de Sistemas, Unidad Laguna, y a sus autoridades por el respaldo institucional brindado. El apoyo de esta casa de estudios al desarrollo de la investigación aplicada en contextos educativos reales refleja su compromiso con la generación de conocimiento que trasciende el aula universitaria y aporta soluciones concretas a las comunidades de su entorno.

VI. REFERENCIAS

Anacker, W., & Wang, C. P. (1967). Performance evaluation of computing systems with memory hierarchies. *IEEE Transactions on Electronic Computers*, (6), 764–773.

Battle, P. A. J. (1999). Home computers and school performance. *The Information Society*, 15(1), 1–10.

Clauser, B. E., & Schuwirth, L. W. (2011). The use of computers in assessment. En *International handbook of research in medical education* (pp. 757–792). Springer Netherlands.

Fortier, P. J., & Michel, H. (2003). *Computer systems performance evaluation and prediction*. Digital Press.

Gálvez Sinibaldi, P. E. (1997). *Propuesta para un modelo administrativo de un centro de cómputo dedicado a la enseñanza* [Tesis doctoral, Universidad del Valle de Guatemala].

Heidelberger, P., & Lavenberg, S. (1984). Computer performance evaluation methodology. *IEEE Transactions on Computers*, 100(12), 1195–1220.

Hernández Brito, C. É. (2011). *Virtualización como una estrategia para reducir costos de operación en centros de cómputo* [Tesis doctoral].

Iosup, A., Ostermann, S., Yigitbasi, M. N., Prodan, R., Fahringer, T., & Epema, D. (2011). Performance analysis of cloud computing services for many-tasks scientific computing. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 22(6), 931–945.

Krishnaswamy, U., & Scherson, I. D. (2000). A framework for computer performance evaluation using benchmark sets. *IEEE Transactions on Computers*, 49(12), 1325–1338.

Lucas, H. (1971). Performance evaluation and monitoring. *ACM Computing Surveys*, 3(3), 79–91.

Macas Romero, G. E. (2019). *Infraestructura tecnológica de los centros de cómputo de las unidades educativas de Santo Domingo*.

Petri, G., & von Wangenheim, C. G. (2017). How games for computing education are evaluated? A systematic literature review. *Computers & Education*, 107, 68–90.

Russell, M. K. (1999). *Testing on computers: A follow-up study comparing performance on computer and on paper*. Boston College.

Sierra Forero, S. (s.f.). Sistema modular de adquisición, gestión y visualización web de métricas de desempeño para centros de cómputo de alto rendimiento. Caso de estudio CECAD.

Venegas, G., & de Jesús, R. (2010). *Mantenimiento preventivo y correctivo de centro de cómputo, TV, video e internet satelital*.

Vetter, J. S., De Supinski, B. R., Kissel, L., May, J., & Vaidya, S. (2005). Evaluating high-performance computers. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 17(10), 1239–1270.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización [Conceptualization]	Alberto Adrián Hernández Cuevas
2	Curación de datos [Data curation]	Alberto Adrián Hernández Cuevas
3	Análisis formal [Formal analysis]	Victor Andrés Ramírez Sánchez
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Víctor Andrés Ramírez Sánchez Martha Iveth Ojeda Núñez José Eduardo Gutiérrez Montoya Lorena Elizabeth Jurado Bichir
5	Investigación [Investigation]	Alberto Adrián Hernández Cuevas
6	Methodología [Methodology]	Martha Ivet Ojeda Núñez
7	Administración del proyecto [Project administration]	José Eduardo Gutiérrez Montoya
8	Recursos [Resources]	Martha Ivet Ojeda Núñez
10	Supervision [Supervision]	Martha Ivet Ojeda Núñez
11	Validación [Validation]	Victor Andrés Ramírez Sánchez
12	Visualización [Visualization]	Victor Andrés Ramírez Sánchez
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Victor Andrés Ramírez Sánchez
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Martha Ivet Ojeda Núñez

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID031

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Reducción de Tiempos del Proceso de Maquinado Aplicando el Trabajo Estandarizado en una Empresa Fabricante de Componentes Metálicos para Automoción en La Laguna de Durango

Reduction of Machining Process Times by Applying Standardized Work in a Company that Manufactures Metal Components for Automotive in La Laguna de Durango

Martínez-Mendoza A.F.[1]; Martínez-Macías G.A.[2]

Datos de Adscripción:

[1] Martínez Mendoza, Alma Fabiola
Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. División de Ingeniería en Gestión Empresarial
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
212310135@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3150-4898

[2] ✉ Martínez Macías, Gerardo Alfredo
Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. División de Ingeniería en Gestión Empresarial
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
gmartinez@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1093-7753

Resumen- **La industria automotriz actualmente enfrenta una evolución histórica. Por lo tanto, este sector industrial requiere proveedores confiables en la entrega de componentes y productos, con los niveles de calidad exigidos y que, además, se ajusten a las demandas del mercado mundial de automóviles. La empresa fabricante de componentes para la automoción, ubicada en La Laguna de Durango, México, enfrentaba problemas en sus tiempos de proceso de maquinado que le impedían cumplir con la meta de 25 piezas por hora para satisfacer los requerimientos de sus clientes. Condiciones habituales, tales como los desgastes prematuros de las herramientas, reprocesos en las piezas producidas, áreas desordenadas, por consecuencia, un flujo productivo en condiciones inestables fueron los hallazgos iniciales de la situación problemática encontrada. El presente trabajo de investigación expone los resultados de un plan de implementación de la metodología de Trabajo Estandarizado, como parte de la Manufactura Esbelta, que inició con un estudio de tiempos y movimientos, observación directa y análisis del proceso, todo ello para establecer un programa de mejoras y, con ello, reducir los tiempos de proceso en el referido sector de maquinado. El apoyo y trabajo en equipo de los operadores, ingenieros y todos los involucrados en el proceso fueron fundamentales para el logro de resultados, reduciendo los tiempos de ciclo en el orden del 21.6%, mejorando el índice de productividad de Job per Hour en los operadores evaluados y obteniendo también un área de trabajo segura, ordenada y productiva.**

Palabras Clave: Calidad, Eficiencia, Manufactura Esbelta, Procesos, Producción, Trabajo Estandarizado.

Abstract **- The automotive industry is currently undergoing a historic transformation. Therefore, this sector requires suppliers that reliably deliver components and products at the required quality levels and can adapt to the demands of the global automotive market. An automotive component manufacturer located in La Laguna, Durango, Mexico, was experiencing problems with its machining process times, preventing it from meeting its target of 25 pieces per hour to satisfy customer requirements. Initial findings included premature tool wear, rework of produced parts, disorganized work areas, and, consequently, an unstable production flow. This research presents the results of an implementation plan for the Standardized Work methodology, as part of Lean Manufacturing. The plan began with a time and motion study, direct observation, and process analysis, which were used to establish an improvement program and reduce processing times in the machining area. The support and teamwork of the operators, engineers, and everyone involved in the process were fundamental to achieving results, reducing cycle times by 21.6%, improving the Job per Hour productivity index of the evaluated operators, and also obtaining a safe, orderly, and productive work area.**

Keywords: Efficiency, Lean Manufacturing, Processes, Production, Quality, Standardized Work

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, para la industria automotriz, la constante es el cambio y la innovación de sus productos y, de la misma manera, los procesos de fabricación de las piezas requeridas, las cuales pueden ser tan diversas, tales como partes electrónicas, mecánicas y componentes metálicos, todos necesarios para la formación de un vehículo automotor que demanda un cliente en cualquier parte del mundo. México se encuentra a nivel mundial entre los principales productores de automóviles ligeros para pasajeros, en el quinto lugar en la fabricación y exportación de esta clase en el año 2024, siendo los Estados Unidos de América el principal consumidor de estas unidades, con un 79.7%, seguidos de países como Canadá y Alemania, que demandan las unidades fabricadas en nuestro país. Mientras que para los vehículos pesados utilizados para el transporte de cargas y materiales, esta producción mexicana se ubicaba en el quinto lugar a nivel mundial de acuerdo con la Organización

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID035

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Internacional de Fabricantes de Vehículos Automotores, siendo el principal exportador en el mundo de tractocamiones, "con envíos al exterior que alcanzaron aproximadamente USD 52 mil millones" (Department of Commerce. United States of America, 2026).

En lo que concierne a las autopartes y componentes para la industria automotriz, México se situó en el cuarto lugar a nivel mundial como productor y exportador de partes como motores, autopartes eléctricas, partes para los sistemas de suspensión y transmisión y asientos. Lo anterior es gracias a las 2,135 empresas dedicadas a este sector industrial, con más de 700 de ellas consideradas como proveedores de primer nivel, trabajando diariamente bajo estrictos controles de calidad, es por lo que "la industria de autopartes de México se enfoca en sistemas completos de vehículos y piezas de producción intensiva en mano de obra" (Department of Commerce. United States of America, 2026).

Las exportaciones mexicanas de vehículos ligeros durante el año 2025 fueron de 3,385,785 unidades, destinadas principalmente al 78.4% a los Estados Unidos de América (INEGI, 2026a). En el caso de los vehículos pesados, las exportaciones fueron de 113,931 unidades (INEGI, 2026b). La industria automotriz en México es uno de los sectores productivos relevantes para el Producto Interno Bruto (PIB), que, como lo detallan Case y Fair (1997), representa el valor total de los bienes y servicios generados por una economía nacional en un tiempo específico, comúnmente de un año. Esta rama industrial nacional contribuyó con un valor de 4.5% al Producto Interno Bruto en el tercer trimestre de 2025, todo esto a pesar de una baja con respecto al año 2024, cuyo registro fue de 2.7% del PIB en el tercer trimestre (El Economista, 2025). Este sector sigue siendo uno de los elementos principales de la estructura económica de nuestro país.

De acuerdo con los registros del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas, (INEGI, 2024), DENUE, en el Estado de Durango operan 32 empresas relacionadas a la industria automotriz, de las cuales, ocho se encuentra en la zona metropolitana de La Laguna de Durango, en las ciudades de Gómez Palacio y Lerdo. Ofreciendo productos como sistemas eléctricos y electrónicos, partes para los sistemas de dirección y suspensión, piezas metálicas troqueladas, asientos y accesorios, como bolsas de aire, así como partes metálicas para motores de vehículos, este trabajo de investigación se basa en una de estas unidades productivas. La empresa donde se desarrolló el presente trabajo cuenta actualmente con una plantilla de más de 1000 trabajadores, entre operadores y administrativos, y es considerada una de las principales proveedoras de partes metálicas para la industria automotriz.

Bajo estas condiciones de la demanda de elementos para automotores, en las áreas de manufactura de componentes automotrices mediante procesos de maquinado CNC, estos requieren de precisión, estabilidad operativa y por consecuencia el cumplimiento de las metas de producción, que considerando lo que define Jacobs y Chase (2019) un proceso es el conjunto de actividades de la empresa en las cuales transforma los insumos en productos de valor superior a los insumos iniciales. Como lo menciona Solís et al. (2023) una máquina de CNC, Control Numérico por Computadora, efectúa movimientos lineales y circulares para realizar operaciones tales como cortes, ranurados, fresados en materiales metálicos, que son controlados por medio de programas de computadoras y de esta manera facilitar la ejecución un proceso, sin embargo, el factor humano, es decir el operador, cobra relevancia al ser un elemento necesario en el proceso de producción y debe estar preparado para el logro de los objetivos diarios de producción.

Dentro del enfoque de la Manufactura Esbelta (Lean Manufacturing), creada en una empresa automotriz, *Toyota*, se estable una revisión detallada de todas actividades de la empresa con el objetivo de minimizar el desperdicio en todos los niveles, desde la eficiencia de las máquinas y equipos, hasta la cantidad de individuos que están involucrados en cada operación, que como lo declaran Kalpakjian y Schmid (2008) el objetivo es "mejorar continuamente la eficacia y la rentabilidad de la compañía" (pág. 37), así como otorgar beneficios a los trabajadores al proporcionarles un adecuado método de trabajo y por resultado excelentes condiciones para desarrollar su labor diaria (Niebel & Freivalds, 2009).

El Trabajo Estandarizado es considerado uno de los pilares fundamentales de Lean Manufacturing, y que dentro de sus principales propósitos es determinar un tiempo de ciclo que pueda asegurar la calidad y uniformidad en la producción, y por consecuencia lograr el cumplimiento de la demanda de piezas de los clientes. El tiempo de ciclo es definido por Jacobs y Chase (2019) como el "tiempo promedio entre el término de una unidad y el inicio de la siguiente en un proceso" (pág. 288). Al respecto, Socconini (2008) menciona que, para comprender el trabajo estandarizado, es fundamental observar y medir el trabajo que realizan los operadores, "ya que define de la manera más eficiente los métodos de trabajo para lograr la mejor calidad y los costos más bajos" (pág. 297). Por otra parte, en el trabajo publicado por Mendoza et al. (2024) recalca la necesidad de estandarizar los procesos de una empresa metalmecánica para aumentar la productividad, así como los desafíos por enfrentar para lograr este objetivo, sean empresas consideradas como pequeñas, medianas o grandes empresas, como es el caso de la empresa en la cual se desarrolló el presente trabajo de investigación. El Trabajo Estandarizado aplica a todas las actividades humanas dentro de una organización productiva, cualquier acción repetible desde la más simple como es llenar un reporte de producción en el área de trabajo hasta como ajustar el arranque de una máquina de CNC puede ser mejorada con la aplicación del Trabajo Estandarizado, al definir y organizar los movimientos del trabajador, evitando de esa forma el desperdicio de recursos, incluyendo uno de los más valiosos e irrecuperable que es el tiempo.

Entre los elementos que componen el Trabajo Estandarizado destacan la secuencia estándar de las operaciones, es decir la serie de pasos para completar una operación, así como la rapidez de la demanda, que es establecida por los requerimientos de los clientes, el *takt time* que se define como la "velocidad a la que compra el cliente y es el tiempo al que el sistema de producción debe adaptarse para satisfacer las expectativas del cliente" (Socconini, 2008, pág. 106). Rother y Shook (2003) explican que estos elementos permiten que el sistema funcione con un flujo estable, evitando la sobreproducción, las esperas y las variaciones innecesarias en la operación.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID035

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Para Socconini (2008), la forma de iniciar la implementación del Trabajo Estandarizado es elegir una operación especifica de nuestro proceso productivo, a manera de determinar cómo se hacen las cosas; como paso siguiente es realizar las mediciones de tiempo de cada uno de los elementos de trabajo y determinar los tiempos estándar de la seleccionada operación. Obtenidos los referidos tiempos se procede al cálculo de la capacidad de operación, esto para determinar si el proceso tiene límites que le impidan cumplir con la demanda del cliente, es decir el no estar dentro del *takt time*, en este punto es relevante establecer un plan de acción con mejoras para eliminar toda aquella condición, elemento o desperdicio que obstaculice el cumplimiento de la demanda del cliente, es recomendable utilizar un diagrama de distribución del área de trabajo con el fin de detectar posible zonas de trabajo que necesitan atención por dificultar la secuencia correcta de las operaciones, tales como mesas de trabajo mal colocadas, herramientas en incorrectas colocaciones, iluminarias en posiciones no adecuadas, entre otras condiciones de trabajo, para esto es de utilidad la aplicación de herramientas como el Informe A3, el cual consiste en un análisis del problema de manera simple, plasmando las acciones correctivas y el plan de acciones en una simple hoja de papel tamaño A3 (Lean Enterprise Institute, 2026).

Paso siguiente es la documentación de la secuencia optima de las operaciones, estandarizadas con tiempos balanceados, en la denominada hoja del Trabajo Estandarizado, que como lo define Sánchez (2022), este documento presenta “la mejor combinación de la fuerza laboral, el material y las máquinas” (pág. 5) , aumentando de esta forma la productividad con una adecuada secuencia de las tareas que realizan los trabajadores. Es recomendable que en esta hoja de Trabajo Estandarizado se incluya nuevamente un diagrama de distribución del área de trabajo con las posibles mejoras que fueron implementadas.

Terminada la documentación de las operaciones estandarizadas, en la Hoja de Trabajo Estandarizado, resulta conveniente mencionar que la revisión del Trabajo Estandarizado es continua y programada, que toda operación debe ser analizada periódicamente, por todos los involucrados en el proceso, desde los operadores, ingenieros, hasta gerentes de operación, tal como lo expresa Sánchez (2022), el Trabajo Estandarizado es una manera de desarrollar talento.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

El presente trabajo se fundamenta en la metodología del Trabajo Estandarizado, la cual forma parte de la Manufactura Esbelta, que, según Womack et al. (2003), estandarizar el trabajo permite comparar el desempeño actual contra el ideal; por lo tanto, facilita la reducción de errores, la alineación de procesos con los objetivos operativos y una capacitación eficiente del personal. La reducción de tiempos de proceso en áreas de maquinado, que en especial utilizan máquinas CNC, se inició con la observación de las condiciones operativas de la sección de interés, para determinar posteriormente la aplicación de las correspondientes mejoras, como una forma de implementar un modelo de trabajo apoyado en la Manufactura Esbelta. Esta investigación se inició en junio de 2025 y finalizó en noviembre de 2025.

2.1 Determinación de las condiciones iniciales del área de maquinado

La primera acción del presente trabajo fue observar las condiciones iniciales del área de interés, los maquinados CNC, conocer los elementos esenciales de la operación y su funcionamiento, y detectar puntos relevantes en el proceso. La Figura 1 muestra parte de la maquinaria CNC utilizada en el área de maquinados.

Figura 1
Máquina CNC del área de maquinado



Nota. La ilustración muestra una sección de la máquina del proceso de maquinado CNC. Es conveniente mencionar que, por aspectos de confidencialidad de la empresa donde se realizó este trabajo, no se presenta la totalidad de la máquina.

2.1.1 Tiempo del proceso

Se registraron los tiempos de cada operación dentro de la línea de producción, logrando identificar los cuellos de botella, que, como lo establecen Jacobs y Chase (2019) se pueden definir como el “recurso que limita la capacidad o la producción máxima del proceso” (pág. 288), así como las variaciones del proceso que impedían lograr el máximo rendimiento. Para determinar los tiempos de proceso, se realizaron dos estudios de tiempos y movimientos en dos máquinas CNC representativas del área de maquinado. Primero, se determinaron los elementos de trabajo involucrados en el proceso y se consideró una muestra de 10 ciclos para la toma de tiempos. Para este estudio se solicitó la colaboración de todos los involucrados, en especial de los operadores de la maquinaria, a quienes se les explicó previamente la importancia del referido estudio y el impacto favorable que tendría en su trabajo, y se seleccionó a dos de los operadores del primer turno con mayor experiencia en el área de maquinados. La Tabla 1 presenta los resultados del estudio de tiempos y movimientos de los denominados Operador 1 y Operador 2.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID035

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Tabla 1
Estudio tiempos y movimientos Operador 1 y 2

	Tiempos Promedio (en segundos) Operador 1	Operador 2
1.Marcar y medir piezas.	29.59	28.50
2.Tiempo de maquinado.	78.00	78.00
3.Verificar piezas terminadas.	0.10	0.10
4.Medir rugosidad y perfiles.	0.06	0.06
5.Registrar piezas terminadas en hojas de estado.	0.74	0.73
6.Realizar cambios de herramienta.	0.05	0.05
7.Efectuar carga-descarga.	23.45	23.45
Total	131.99 seg.	130.89 seg.

Nota. Los tiempos presentados son el resultado del promedio de lecturas tomadas para cada elemento de trabajo, en unidades de segundos.

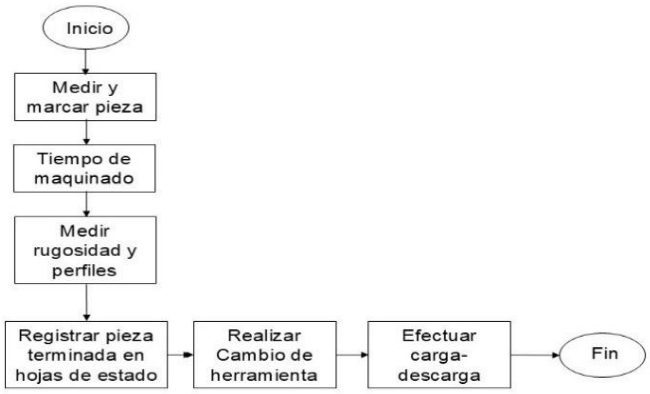
En los resultados de la toma de tiempo se observó una diferencia en los tiempos entre los operadores. Para el Operador 1 el tiempo por piezas fue de 131.99 segundos, que representaba un ritmo de producción de 27.28 piezas por hora, que considerando una eficiencia del 85% el valor era de 23.18 piezas por hora, mientras que para el Operador 2 el ritmo de producción era más alto en el orden de 27.51 piezas por hora, al registrar un tiempo de ciclo más bajo de 130.89 segundos y considerando una eficiencia de 85% el valor final era de 23.38 piezas por hora, siendo el indicador de Jobs Per Hour, JPH, de 25 piezas por hora como la meta mínima establecida por cliente, que en ambos casos quedaba por debajo. El indicador JPH representa la cantidad de piezas terminadas por hora bajo condiciones normales de producción, como un estándar de producción basado en las piezas producidas aceptablemente en una unidad de tiempo y que no reconoce las piezas con defectos (Niebel & Freivalds, 2009), lo que permite evaluar la productividad de la línea al mejorar la calidad. Durante la realización de los estudios de tiempos se observaron condiciones de desgaste en las herramientas, lo que originaba la necesidad de retrabajos en las piezas procesadas y, por lo tanto, incrementaba los tiempos de maquinado.

2.1.2 Distribución del área de trabajo

Una vez obtenidos los tiempos de operación, se analizaron la organización de las estaciones de trabajo, el flujo de materiales y la secuencia de tareas, con el objetivo de detectar posibles movimientos innecesarios. Como primer paso se elaboró un diagrama del proceso para visualizar las tareas realizadas. La Figura 2 muestra el diagrama de proceso del área de maquinado.

Este diagrama por bloques permitió comprender el funcionamiento del proceso e identificar las actividades y detectar los cuellos de botella, principalmente en el marcado y la medición de piezas y las posibles restricciones, como el desgaste prematuro de la herramienta.

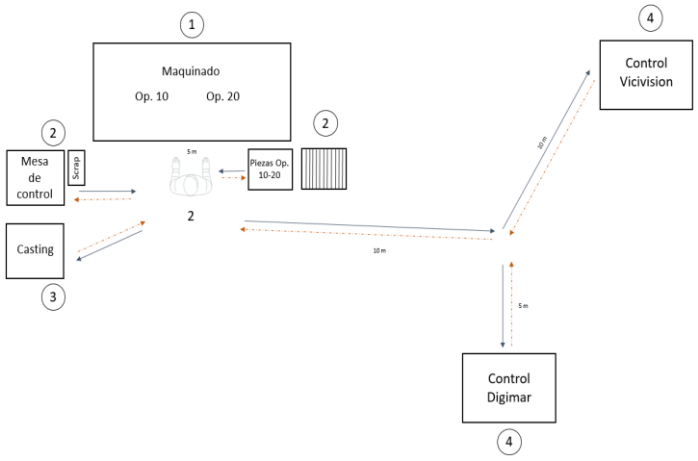
Figura 2
Diagrama de bloques del proceso de maquinado



Nota. El diagrama de procesos en bloques muestra la secuencia de actividades del área de maquinado y sus relaciones.

De la misma manera, se elaboró el esquema de distribución del equipo, layout, para representar gráficamente la disposición de los equipos, estaciones de trabajo y área de flujo de materiales. Nuevamente, esto facilitó visualizar la secuencia de las actividades del área de máquina y la identificación de posibles áreas de mejora en la organización del espacio y la optimización del flujo productivo. La Figura 3 muestra el layout de las áreas de trabajo de la máquina.

Figura 3
Layout de área de máquina de maquinados



Nota. Distribución de la línea de maquinado que representa las áreas, los equipos y las estaciones de trabajo.

La elaboración del layout permitió detectar condiciones del área de trabajo por mejorar, tales como delimitación de las secciones de trabajo, limpieza en ciertas partes de la máquina, como es el caso de acumulación de rebabas de metal que se generan en el proceso de maquinado, como se muestra en la Figura 4, estos sobrantes metálicos generaban interrupciones en la línea y aumentaban el tiempo de producción, impactando negativamente en la productividad.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID035

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 4
Sobrantes metálicos en máquinas



Nota. Durante el proceso de maquinado, la generación de rebabas metálicas es constante; sin embargo, la falta de limpiezas puede provocar retraso en los tiempos de proceso.

También se pudo observar que algunos de los equipos de la línea de producción no presentaban registros de realización de mantenimientos preventivos, lo que posiblemente originaba variaciones en los procesos y, en consecuencia, variaciones en la calidad de las piezas y un incremento en los retrabajos de piezas elaboradas. Asimismo, se observaron piezas aceptadas por calidad, así como piezas rechazadas por calidad, además de líquidos utilizados en el proceso de corte derramados en el piso del área de la máquina y en el área de trabajo del operador.

2.2 Implementar el Trabajo Estandarizado

Determinadas las condiciones iniciales del área de maquinado, el siguiente paso fue poner en funcionamiento el Trabajo Estandarizado, sin olvidar que ello conlleva acciones de mejora en el área de trabajo y la participación de todos los involucrados en la referida sección laboral.

2.2.1 Informe A3

Para iniciar la implementación del Trabajo Estandarizado se elaboró el informe A3, que permitió identificar las principales problemáticas del área, analizar las causas raíz y establecer un plan de acción enfocado en la mejora de los procesos. Esta herramienta sirvió como base para estructurar de manera ordenada las etapas para alcanzar la estandarización de las operaciones. La Figura 5 presenta el Informe A3.

Figura 5
Informe A3

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO : Estandarización del Proceso
Julio- Noviembre 2025

A) Diseño de especificación: Métodos de Trabajo

B) Tiempo Improductivo: Condiciones de trabajo

C) Trabajador: Seguridad, Capacitación

CONDICIÓN OBJETIVO:
Noviembre 2025

1. Factor Humano: Aplicación de la estandarización de actividades.
2. Procesos: Modificación del proceso inserto y cambios de velocidad de corte.
3. Calidad: Creación de contenedor para piezas scrap con el fin de evitar mezclar piezas buenas con piezas malas.
4. Espacios de trabajo: Gestión de 5´S para mantener organizado, seguro y limpio la línea de producción.

CONDICIÓN ACTUAL:
Julio 2025

1. Factor Humano: Capacitación del personal operativo para la actualización de hojas de trabajo estandarizado y no repetitivo.
2. Procesos: Optimizar el proceso de corte para disminuir el tiempo en la operación.
3. Calidad: Mejora en las condiciones de proceso de separación de piezas buenas y piezas malas.
4. Espacios de trabajo: Evaluación de las condiciones inseguras en el área de trabajo por derrames de líquidos de corte, eliminación de concentración de rebabas para la concentración y rendimiento operativo.

ACTIVIDADES MEJORA

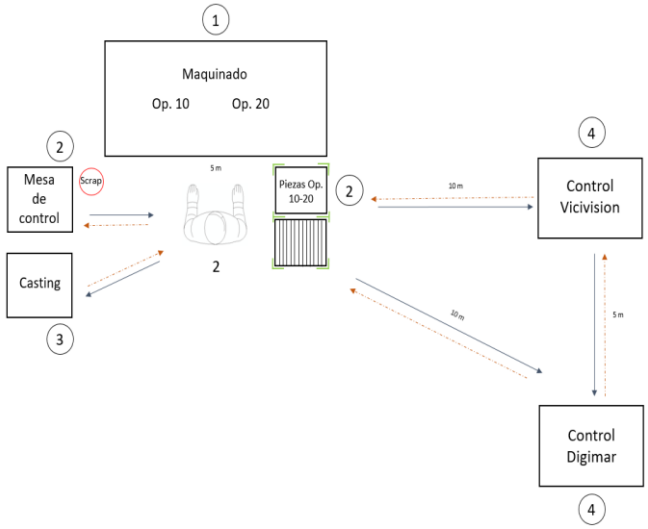
DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE	INICIO	FIN	STATUS
Hojas de Trabajo Estandarizado, seguimiento operador	Ing. Procesos	Julio	Noviembre	
Mejora inserto de mecanizado y programa	Ing. Procesos	Julio	Noviembre	
Evitar Mezcla de piezas buenas y malas	Calidad-Producción	Agosto	Septiembre	
Mejorar las condiciones de la maquina, limpieza y organización área trabajo	Calidad-Producción-Mantenimiento		Noviembre	

Nota. El Informe A3 detalla la condición inicial encontrada y la condición objetivo para el área de proceso de maquinado, con sus respectivas actividades de mejora, determinadas por el equipo de trabajo responsable.

2.2.2 Mejora en las condiciones de espacio de trabajo de la máquina

Durante la toma de tiempos y movimientos se detectó que no existía una clara separación de las zonas destinadas al material en proceso, lo que complicaba el monitoreo del flujo de producción y aumentaba los tiempos requeridos para buscar y manejar el material. Por lo tanto, se llevó a cabo la delimitación física de las áreas de trabajo, el marcaje de piso, el uso de ayudas visuales y la señalización de las zonas destinadas al material en proceso, a las piezas terminadas y al material pendiente de mecanizar. La identificación de estas áreas permitió mejorar el flujo de producción y eliminar las obstrucciones y demoras en las actividades de carga y descarga de la máquina. Igualmente se revisaron los espacios y dispositivos destinados al scrap, delimitando la colocación de contenedores para piezas destinadas a scrap. Al mismo tiempo, la participación del personal de mantenimiento en el área de maquinado fue crucial para la revisión, ajuste y reparación de los dispositivos de líquidos de corte que se derramaban tanto en la máquina como en el piso, y los cambios a nuevos contenedores para el depósito de rebabas metálicas, así como los ajustes a las herramientas y sensores de calidad utilizados en la máquina. Todas estas acciones lograron un entorno más ordenado y seguro para el operador. La Figura 6 muestra el layout con las mejoras en el área de maquinado.

Figura 6
Layout con mejoras en área de máquina de maquinados



Nota. La colocación de áreas para contenedores para scrap y la demarcación de las áreas de trabajo contribuyen directamente a la eficiencia operativa.

2.2.2 Hoja de Trabajo Estandarizada

Realizadas las mejoras en área de trabajo de maquinados el registro de la hoja de Trabajo Estandarizado era el siguiente paso a cumplir, todo esto bajo la ejecución de un nuevo estudio de tiempos y movimientos, así como la definición de los elementos de trabajo estandarizados, que permitió eliminar el elemento de trabajo Medir la rugosidad y perfiles, ya que se incorporó al elemento de trabajo de Verificar piezas terminada en control de calidad, con dispositivos electrónicos calibrados para ese efecto. La Tabla 2 presenta los tiempos y elementos registrados después

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID035

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

de las mejoras implementadas, lo que se traduce en una reducción de los tiempos de espera y de traslado, así como en una mejor sincronización en las operaciones de carga, descarga y verificación de las piezas.

Tabla 2
Estudio tiempos y movimientos Final Operador 1 y 2

	Tiempos Promedio (en segundos) Operador 1	*Operador 2*
1.Marcar y medir piezas.	18.50	17.50
2.Tiempo de maquinado.	70.00	70.00
3.Verificar pieza en control de calidad	0.10	0.10
4.Registrar piezas terminadas en hojas de estado.	0.74	0.73
5.Realizar cambios de herramienta.	0.05	0.05
6.Efectuar carga-descarga.	14.00	14.00
Total	103.39 seg.	102.38 seg.

Nota. Los tiempos son el resultado del promedio para cada elemento de trabajo, en unidades de segundos.

Estos tiempos estándar finales de los dos operadores fueron obtenidos después de la depuración de actividades y la estandarización de la secuencia de trabajo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente trabajo de investigación, orientado a reducir los tiempos de proceso de maquinado de una empresa proveedora de autopartes metálicas para la industria automotriz, la aplicación del Trabajo Estandarizado permitió obtener resultados que impactaron en la mencionada área productiva.

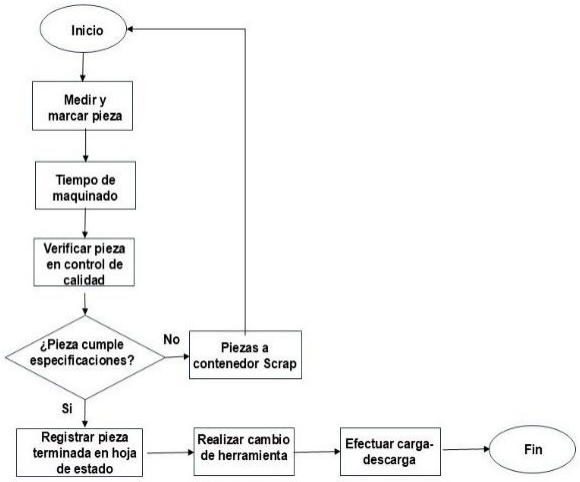
3.1 Un proceso mejorado

En el proceso inicial, si la pieza no cumplía con las especificaciones, no se procedía a etiquetar la pieza como scrap, lo que ocasionaba que las piezas con especificaciones de calidad se mezclaran con las no conformes. La principal mejora se logró en el punto de decidir si la pieza cumple con las especificaciones del cliente; en caso de resultado negativo, se deposita en el contenedor expresamente colocado en el área de trabajo para su confinamiento. En la Figura 7 se muestra el diagrama de los puntos de mejora del proceso.

3.2 Herramientas y mantenimiento del equipo

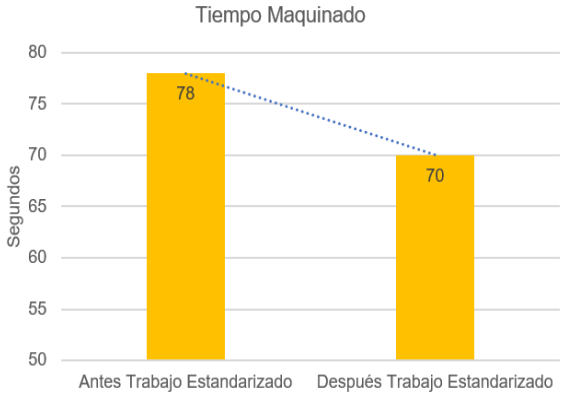
Una mejora significativa en la eficiencia del proceso de máquina fue la revisión y verificación de las condiciones de los herramentales, que incluían los insertos de corte. El desgaste prematuro limitaba su vida útil a 75 piezas, afectando el tiempo de ciclo. Mediante la sustitución programada de las herramientas, se redujo considerablemente el proceso de maquinado al disminuir el número de pasos de desbaste en la pieza y, por lo tanto, se redujo el ciclo de maquinado de 78 a 70 segundos, tal como lo presenta la Figura 8.

Figura 7
Diagrama de bloques del proceso de maquinado con mejoras



Nota. El diagrama de bloques de proceso modificado introduce la lógica para el manejo de la pieza que no supera la inspección. En la versión inicial del proceso, si la pieza no cumplía con las especificaciones, solo se etiquetaba como pieza scrap, quedando la posibilidad de ser mezclada con las piezas que sí cumplían las especificaciones del cliente.

Figura 8
Reducción de tiempos de maquinado



Nota. La reducción de 8 segundos en el tiempo de maquinado fue parte esencial del resultado total obtenido.

Es conveniente recalcar que la revisión de este punto, en lo que se refiere a lo herramental, debe ser un compromiso continuo de todos los involucrados en el área de proceso, incluyendo a la gerencia de la empresa, por el impacto económico que conlleva la sustitución de herramientas en condiciones de desgaste o la búsqueda de nuevas herramientas de mayor duración, pero de mayor costo. Otro de los resultados obtenidos en la implementación del Trabajo Estandarizado fue la creación de reuniones de revisión de las condiciones de la maquinaria, equipo y área de trabajo con el programa de *Turno con Arranque Seguro*, que incluía desde la revisión de la maquina al inicio de turno, la limpieza y orden de las secciones de trabajo, hasta la programación de mantenimientos preventivos con la participación del mismo operador de la maquina y el personal del departamento de mantenimiento. Todo lo anterior sirvió para fomentar las condiciones de seguridad, limpieza, orden e incluso

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID035

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

ergonomía antes del inicio del turno. La Figura 9 presenta los puntos de revisión por parte del operador de máquina al inicio de su jornada laboral.

Figura 9
Revisión de Turno con Arranque Seguro

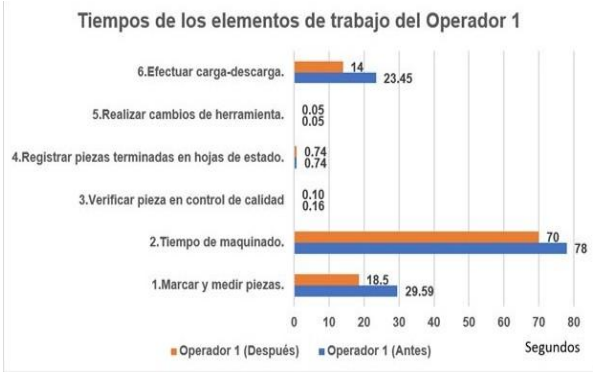
No.	Punto de verificación / Estado del área	1ER TURNO	2DO TURNO	3ER TURNO
1.	¿Cuento con mi Equipo de Protección Personal (EPP) completo y en buenas condiciones?			
2.	¿Estoy entrenado para desarrollar mi operación con todas sus actividades?			
3.	¿Tengo las herramientas y equipos necesarios (y en buen estado) para realizar mi operación?			
4.	¿Mi área de trabajo está libre de puntos de tropiezo y de derrames de líquidos de corte?			
5.	¿La iluminación en mi área de trabajo es la correcta (suficiente y sin deslumbramiento)?			
6.	¿Las 5´S del área se encuentran en el estado establecido (orden y limpieza)?			
7.	¿Tengo plena conciencia y control sobre mis manos, manteniéndolas fuera de equipos y/o partes en movimiento?			

Nota. La participación y el involucramiento del operador son relevantes para la eliminación de todas las condiciones que impidan la continuidad de las operaciones del área de maquinado.

3.3 Un Trabajo Estandarizado inicia

Como consecuencia de las actividades de mejora que se establecieron en el Informe A3, los tiempos de ciclos de los Operadores 1 y 2 disminuyeron considerablemente, con elementos de trabajo estandarizados para ambos operadores y la eliminación del elemento de trabajo de *Medir rugosidad y perfiles*, para unificar en solo elemento *Verificar pieza en control de calidad,* al contar con los dispositivos de medición y métodos más rápidos e integrados en la estación de trabajo. La Figura 10 muestra los tiempos de los elementos de trabajo antes y después de la estandarización del Operador 1, se debe destacar que uno de los principales cambios fue el tiempo de maquinado que decreció un 10.2%, pasando de 78 segundos a 70 segundos, así también el tiempo de carga-descarga bajo en un valor de 40.2% de tiempo antes de la puesta en marcha del Trabajo Estandarizado.

Figura 10
Elementos de Trabajo del Operador 1



Nota. Los tiempos en segundos de los elementos de trabajo del Operador 1 disminuyeron como resultado de las mejoras en el área de trabajo.

Por otra parte, el Operador 2 logró un registro de los tiempos de los elementos de trabajo por debajo de los valores iniciales, por ejemplo, el tiempo del elemento de trabajo de Marcar y medir pieza la disminución fue del orden de un 38.6%, como se detalla en la Figura 11.

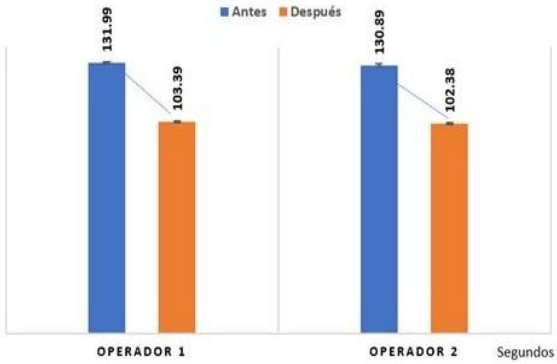
Figura 11
Elementos de Trabajo del Operador 2



Nota. El Operador 2 presentó disminuciones en los tiempos de los elementos de trabajo, expresados en segundos. Fuente: Elaboración propia.

A causa de la disminución de los tiempos en los elementos de trabajo, el tiempo de ciclo también registró una considerable baja, tal como se presenta en la Figura 12, donde se comparan los tiempos de ciclo antes y posteriormente a la aplicación del Trabajo Estandarizado.

Figura 12
Tiempos de Ciclo de los Operadores 1 y 2



Nota. Los tiempos de ciclo de trabajo en segundos de ambos operadores disminuyeron considerablemente debido a las mejoras en el área de trabajo y a la estandarización de los elementos de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

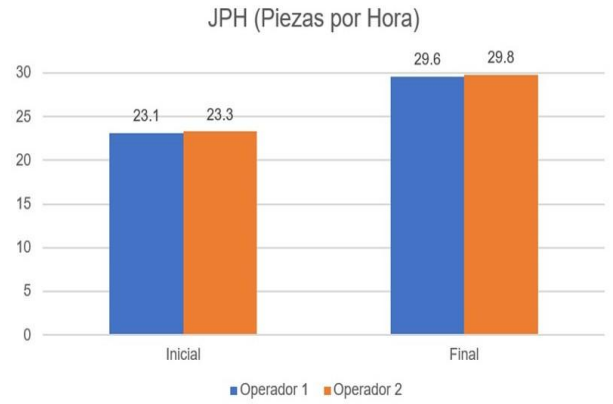
Ante estos nuevos tiempos de ciclo, el indicador JPH igualmente se modificó, el Operador 1 con un tiempo de ciclo de 103.39 segundos por pieza, generó un JPH de 29.6 piezas por hora, considerando una eficiencia de 85%, establecida por la empresa. De la misma manera, para el Operador 2, con un tiempo de ciclo de 102.38 segundos por pieza, el indicador JPH registró un valor de 29.8 piezas por hora, bajo el mismo valor de eficiencia. La

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID035

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 13 muestra la comparación del JPH de los Operadores 1 y 2 con el valor mínimo de JPH establecido por el cliente.

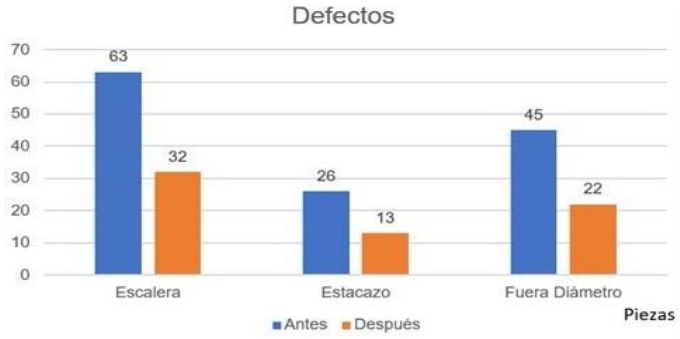
Figura 13
Piezas por hora de Operador 1 y 2



Nota: La disminución de los tiempos de ciclos otorgó un aumento de las piezas por hora, JPH para los Operadores 1 y 2 considerando una eficiencia del 85%. Fuente: Elaboración propia.

La diferencia registrada entre los Operadores 1 y 2 en el indicador JPH fue considerada como aceptable al valorar la experiencia del Operador 2, que motivó establecer un programa de capacitación reconociendo la experiencia de los mismos operadores.
Finalmente, dentro de los resultados de poner en marcha el Trabajo Estandarizado se detectó una disminución de las piezas reportadas con scrap en el proceso de maquinado. Los considerados como los principales defectos, denominados Escalera, Estacazo y Fuera de Diámetro, disminuyeron en el proceso de maquinado. La Figura 14 muestra la relación entre el decremento de scrap.

Figura 14
Defectos en área de maquinados



Nota. Los principales defectos en las piezas del proceso de maquinado presentaron una reducción; por lo tanto, el número de piezas producidas que pasaron a scrap también disminuyó.

Estos resultados reflejaron un mayor control del proceso, una disminución de la variabilidad y una mejora de la estabilidad operativa, evidenciando el impacto positivo de la estandarización en la calidad y el aprovechamiento de los recursos productivos.

IV. CONCLUSIONES

Una empresa no puede permanecer sin cambios. La relevancia que tiene la industria automotriz para el país y la región de La Laguna, motiva a que todos los profesionistas, técnicos y operadores se involucren en todo tipo de acciones que impulsen mejoras que diariamente necesita el proceso productivo.
La puesta en acción del Trabajo Estandarizado no es un proceso sencillo ni simple, requiere de la participación de todos los involucrados, dentro y fuera del área de producción. Para la organización productiva, la aplicación del trabajo estandarizado fue la punta de flecha para conseguir los objetivos planteados, que en este caso en particular fueron la reducción de los tiempos de proceso de maquinado para la producción de componentes para automotores, de clientes de una industria automotriz que exigen la mejor calidad al menor costo.
La utilización de un trabajo estandarizado en el área de maquinado impulsó la generación de ideas creativas necesarias para definir un plan de acción para las modificaciones requeridas no solo en la máquina, sino también en toda el área de trabajo, donde el operador se tenía que adaptar ante la ausencia de elementos y dispositivos de trabajo que le impedían reducir los tiempos del proceso. Acciones concretas como la delimitación de área de confinamiento para piezas de scarp, permitió la visualización del problema oculto que significaba no reconocer las piezas buenas de las piezas que estaban fuera de las especificaciones del cliente. La toma de tiempos en los diversos ejercicios de estudio de tiempos y movimientos aportó la pauta para identificar los elementos de trabajo necesarios para la operación, dejando fuera los elementos no productivos y definiendo la secuencia correcta del trabajo de maquinado, para obtener un tiempo de ciclo con una reducción del orden del 21.6 % respecto a los valores iniciales.
La participación de los diferentes departamentos de servicio, como mantenimiento y calidad, facilitó las actividades necesarias para lograr mejoras en el área de trabajo. Los ajustes a los herramentales, la colocación de contenedores de scrap, así como la distribución del área de trabajo (layout), dieron como resultado disminuir los tiempos de ciclo y minimizar las variaciones entre operadores, todo ello sin afectar la calidad del producto.
El cumplimiento del indicador JPH, piezas por hora, fue el reto inicial de presente estudio, el reducir los tiempos de operación de cualquier área de producción, como en el caso del área de maquinado implicaba como resultado esperado un incremento de las piezas por hora. El hecho de poner en práctica el Trabajo Estandarizado en la referida área de producción demostró que este método de la Manufactura Esbelta fue el más conveniente para la consecución del objetivo, reducir el tiempo de maquinado y, en consecuencia, cumplir con los requerimientos del cliente, que establecía como mínimo 25 piezas por hora, quedando demostrado que se puede superar esta meta, con 29 piezas por hora.
Durante el desarrollo de este trabajo de investigación el factor humano no quedo fuera, la participación y el sentido de cumplimiento de los involucrados fue uno de los eslabones necesarios para lograr una cadena de cambios y éxitos en los resultados, desde el Operador 1 que deseaba igualar al Operador 2, de mayor experiencia en la operación, del supervisor de producción y calidad que otorgaban la oportunidad de aplicar las

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID035

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

mejoras sugeridas por su propios operadores y compañeros del área de maquinado.

En definitiva, el trabajo estandarizado que se ha implementado en el área de proceso de maquinado debe replicarse en las diferentes secciones productivas de la empresa, basado en la experiencia adquirida y en el reto que conlleva el cambio en la forma de trabajar, pero, sin lugar a duda, el resultado siempre será favorable para toda la organización que produce componentes para automotores. El trabajo estandarizado no es un valor registrado en un papel para siempre, es la búsqueda de las mejoras para un proceso todos los días.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, por las facilidades otorgadas para la realización del presente trabajo de investigación, así como a la División de Ingeniería en Gestión Empresarial por el tiempo y el apoyo brindados. De la misma manera, se agradece a todas las personas que de una u otra forma participaron con su experiencia y conocimiento en la realización de este logro y que todos los días entregan todo su esfuerzo para lograr un mejor país.

VI. REFERENCIAS

Case, K. E., & Fair, R. C. (1997). *Principios de Macroeconomía* (Cuarta ed.). México: Pearson Educación. Recuperado el Mayo de 2026

Department of Commerce. United States of America. (11 de Febrero de 2026). *Guía Comercial México*. Recuperado el Mayo de 2026, de International Trade Administration: https://www.trade.gov/country-commercial-guides/mexico-automotive-industry

El Economista. (28 de Noviembre de 2025). *El Economista. Empresas*. Recuperado el Abril de 2026, de El Economista: https://www.eleconomista.com.mx/empresas/industria-automotriz-aporto-4-5-pib-mexico-3t-20251128-788750.html

INEGI. (2024). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas.* Obtenido de https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/

INEGI. (9 de Enero de 2026a). *Sala de Prensa.* Recuperado el Mayo de 2026, de INEGI: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2026/rm_raiavl/rm_raiavl2026_01.pdf

INEGI. (Marzo de 2026b). *Registro Administrativo de la Industria Automotriz de Vehículos Pesados (RAIAVP).* Recuperado el Mayo de 2026, de https://www.inegi.org.mx/datosprimarios/iavp/

Jacobs, R., & Chase, R. (2019). *Administración de Operaciones. Producción y Cadena de Suministros.* México: Mc Graw Hill.

Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (Quinta ed.). Pearson Prentice Hall.

Lean Enterprise Institute. (2026). *Lean Enterprise Institute*. Recuperado el Mayo de 2026, de https://www.lean.org/lexicon-terms/a3-report/

Mendoza Galvis, D., Vega Molina , A., Pumarejo Sanchez, J., & Mario Zambrano, C. (Enero de 2024). *Revista de Investigación. Administración e Ingeniería.* doi:10.15649/2346030X.3529

Niebel, B. W., & Freivalds, A. (2009). *Ingeniería Industrial. Métodos, estándares y diseño del trabajo.* México: Mc Graw Hill. Recuperado el 2026

Rother, M., & Shook, J. (2003). *Aprendiendo a ver. Mapeo del flujo de valor para agregar valor y eliminar el desperdicio.* Lean Enterprise Institute.

Sánchez, O. B. (Septiembre de 2022). *Virtual.cuautitlan.unam.mx.* Recuperado el Mayo de 2026, de chrome-extension://efaidnbmnnnhttps://virtual.cuautitlan.unam.mx/CongresoCiTec/Memorias_Congreso/Anio7_No7/Extensos/IP-03.pdf

Socconini, L. P. (2008). *Lean Manufacturing. El sistema de gestión empresarial japonés que revolucionó la manufactura y los servicios.* Grupo Editorial Norma.

Solís Santamaría, S., Solís Santamaría Tannia, Lasluisa Naranjo, H., & Albán Andrade, E. (Marzo de 2023). *Revista Científica INGENIAR. Ingeniería, Tecnología e Investigación.* doi:10.46296/ig.v6i11.0083

Womack, J., Jones, D., & Ross, D. (2003). *La máquina que cambio el mundo.* Norma Editorial.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización [Conceptualization]	Alma Fabiola Martínez Mendoza, Gerardo Alfredo Martínez Macías
2	Curación de datos [Data curation]	Alma Fabiola Martínez Mendoza, Gerardo Alfredo Martínez Macías
3	Análisis formal [Formal analysis]	Alma Fabiola Martínez Mendoza, Gerardo Alfredo Martínez Macías
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Alma Fabiola Martínez Mendoza, Gerardo Alfredo Martínez Macías
5	Investigación [Investigation]	Alma Fabiola Martínez Mendoza, Gerardo Alfredo Martínez Macías
6	Methodología [Methodology]	Alma Fabiola Martínez Mendoza, Gerardo Alfredo Martínez Macías
7	Administración del proyecto [Project administration]	Alma Fabiola Martínez Mendoza, Gerardo Alfredo Martínez Macías
8	Recursos [Resources]	Alma Fabiola Martínez Mendoza, Gerardo Alfredo Martínez Macías
9	Software [Software]	No aplica.
10	Supervision [Supervision]	Gerardo Alfredo Martínez Macías
11	Validación [Validation]	Alma Fabiola Martínez Mendoza, Gerardo Alfredo Martínez Macías
12	Visualización [Visualization]	Alma Fabiola Martínez Mendoza, Gerardo Alfredo Martínez Macías
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Alma Fabiola Martínez Mendoza, Gerardo Alfredo Martínez Macías
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Alma Fabiola Martínez Mendoza, Gerardo Alfredo Martínez Macías

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID035

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Evaluación del Conocimiento, Uso y Percepción de la Inteligencia Artificial en Estudiantes de Educación Secundaria

Assessment of Knowledge, Use, and Perception of Artificial Intelligence among Secondary Education Students

Ojeda-Núñez, M.I.[1]; Ramírez-Sánchez, V.A.[2] ✉; Gutiérrez-Montoya, J.E.[3]; Jurado-Bichir, L.E.[4]; Montelongo-Bocanegra, J.L.[5]

Datos de Adscripción:

[1] Ojeda Núñez, Martha Iveth
Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón, Coahuila. México.
m.ojeda@uadec.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8312-6343

[2] ✉ Ramírez Sánchez, Víctor Andrés
Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón, Coahuila. México.
victorramirez@uadec.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4872-0942

[3] Gutiérrez Montoya, José Eduardo
Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón, Coahuila. México.
jose_gutierrez@uadec.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0460-8327

[4] Jurado Bichir, Lorena Elizabeth
Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón, Coahuila. México.
ljuradobichir@uadec.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0122-6853

[5] Montelongo Bocanegra, Jonatan Leonel
Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón, Coahuila. México.
montelongojonatan@uadec.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2286-3046

***Resumen*: El objetivo de esta investigación fue evaluar el conocimiento, el uso y la percepción de la Inteligencia Artificial en estudiantes de primero, segundo y tercer grado de la Secundaria Técnica No. 47 "José Santos Valdez García", ubicada en el Ejido Corona de Matamoros, Coahuila. Se realizó un estudio cuantitativo, de diseño no experimental y transversal, en una muestra probabilística de 131 estudiantes, mediante un cuestionario tipo Likert previamente validado; los datos obtenidos fueron analizados mediante técnicas de estadística descriptiva e inferencial. Los resultados evidenciaron que el 85.5 % de los estudiantes utiliza internet diariamente, lo que indica un elevado nivel de acceso a las tecnologías digitales. Asimismo, el 44.3 % manifestó conocer el concepto de inteligencia artificial, el 42.7 % indicó haber oído hablar de esta tecnología y el 13 % señaló desconocerla. Además, el 72.5 % afirmó haber utilizado herramientas de inteligencia artificial, mientras que el 79.4 % manifestó una percepción positiva y un alto interés en incorporarlas a las actividades escolares. Estos hallazgos muestran que, aunque existe una importante familiarización con las herramientas basadas en la inteligencia artificial, su aprovechamiento con fines educativos aún presenta áreas de oportunidad. Se concluye que es necesario fortalecer las estrategias didácticas que permitan integrar la inteligencia artificial en las asignaturas en las que su implementación resulte pertinente. En este sentido, se diseñó e implementó una plataforma web educativa que proporciona a los estudiantes acceso a herramientas gratuitas de inteligencia artificial para promover el desarrollo de competencias digitales y el fortalecimiento del aprendizaje autónomo y significativo en estudiantes de educación secundaria.**

Palabras Clave: Educación, Estudiantes, Inteligencia Artificial, Internet, Tecnología Educativa.

Abstract: The objective of this investigation was to evaluate the knowledge, use, and perception of Artificial Intelligence among first-, second-, and third-grade students at Technical Secondary School No. 47 "José Santos Valdez García" located in Ejido Corona, Matamoros, Coahuila. This quantitative study used a non-experimental, cross-sectional design and a probabilistic sample of 131 students. Data were collected through a previously validated Likert-type questionnaire and analyzed using descriptive and inferential statistical techniques. The results showed that 85.5% of students use the Internet daily, indicating high access to digital technologies. Furthermore, 44.3% reported being familiar with the concept of Artificial Intelligence, 42.7% indicated that they had heard about this technology, and 13.0% reported having no prior knowledge of it. In addition, 72.5% said they had used Artificial Intelligence tools, while 79.4% expressed a positive perception and strong interest in incorporating these technologies into school activities. These findings indicate that, although students are considerably familiar with Artificial Intelligence-based tools, their educational use still presents opportunities for improvement. It is concluded that teaching strategies should be strengthened to facilitate the integration of Artificial Intelligence into school subjects where appropriate. Accordingly, an educational web platform was designed and implemented to provide students with free access to Artificial Intelligence tools, promoting the development of digital competencies and strengthening autonomous and meaningful learning among secondary school students.

Keywords: Artificial Intelligence, Education, Educational Technology, Internet, Students

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID036

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

I. INTRODUCCIÓN

La evolución tecnológica está transformando los sectores de la sociedad, en particular, el ámbito educativo, donde la incorporación de herramientas basadas en la inteligencia artificial comienza a estructurar los procesos de enseñanza y aprendizaje (Fombona et al., 2025). La inteligencia artificial se ha convertido en una de las tecnologías con mayor proyección en el ámbito educativo debido a su capacidad para automatizar procesos, adaptar contenidos y ofrecer experiencias de aprendizaje personalizadas que favorecen una formación más eficiente, centrada en las necesidades específicas de los estudiantes (Bolaño & Duarte, 2024).

El avance de la IA ha permitido el desarrollo de múltiples aplicaciones educativas que están orientadas al fortalecimiento de las competencias académicas fundamentales, como lo son la lectura, la escritura, la resolución de problemas y el aprendizaje autónomo (Achuthan, 2025). Dentro de este mismo contexto, la incorporación de plataformas educativas, las tutorías inteligentes y actividades, permiten ajustar los contenidos temáticos personalizando los niveles de dificultad de acuerdo con el perfil y desempeño de cada estudiante, favoreciendo los procesos de aprendizaje personalizados (Molenaar, 2022).

La incorporación de tecnologías basadas en IA generativa permite la creación de contenido original, lo que amplía las posibilidades de interacción entre los estudiantes y entornos digitales de aprendizaje (Crompton & Burke, 2023). El uso de asistentes virtuales ha demostrado tener respuestas inmediatas, explicaciones detalladas, generación de contenido y asesorías académicas en tiempo real, lo que facilita una nueva forma de apoyo educativo dentro y fuera del aula (Tlili et al., 2023), lo que transforma la manera en que los estudiantes acceden a la información, así como a la construcción del conocimiento y al desarrollo de habilidades digitales (Hong & Kim, 2025).

Diversos estudios señalan que al integrar la IA en el ámbito educativo se contribuye de manera significativa al fortalecimiento del aprendizaje significativo, de la motivación académica y del desarrollo de competencias digitales (Minga & You, 2020). No obstante, también se identifican desafíos importantes en la implementación, como la capacitación docente, la infraestructura tecnológica y la necesidad de promover el uso ético y responsable de las herramientas (Miao et al., 2021). De igual manera, se presenta una preocupación respecto a la dependencia tecnológica por parte de los estudiantes, así como a la confiabilidad de los algoritmos utilizados en plataformas educativas inteligentes (Uyar et al., 2026).

A pesar del interés de incorporar tecnologías de IA dentro de los procesos educativos, en el ámbito de la educación secundaria existe limitada evidencia empírica sobre el nivel de conocimiento, uso y percepción que tienen los estudiantes respecto a estas herramientas, particularmente en instituciones públicas en México (Lee et al., 2024). La mayoría de las investigaciones recientes se han concentrado en la educación superior, lo que deja un vacío importante en los niveles educativos básicos respecto a cómo es la interacción de los estudiantes con la tecnología educativa, así como en la detección de cuáles son las principales necesidades, limitaciones y expectativas (Ang et al., 2024).

La inteligencia artificial no debe considerarse únicamente como una herramienta de generación automática de contenido, sino que debe utilizarse como un recurso con potencial para fortalecer procesos personalizados que apoyen el desempeño académico y el acompañamiento educativo (Kasneci et al., 2023). Sin embargo, diversos autores coinciden en que dichas capacidades no se aprovechan plenamente en los entornos escolares, debido a la falta o limitación de acceso, al desconocimiento tecnológico y a la ausencia de estrategias pedagógicas que logren su integración.

En este escenario, se considera necesario examinar el conocimiento, el uso y la percepción de la inteligencia artificial en estudiantes de educación secundaria, con el propósito de determinar el nivel de interacción que mantienen con estas tecnologías y analizar las oportunidades que ofrece su incorporación en el ámbito educativo. En atención a este objetivo, el estudio se desarrolló en la Escuela Secundaria Técnica No. 47 “José Santos Valdez García”, ubicada en el Ejido Corona, Matamoros, Coahuila, con un enfoque cuantitativo, un diseño no experimental y de corte transversal.

Además de los hallazgos obtenidos mediante el análisis estadístico, esta investigación aporta una contribución práctica mediante el diseño e implementación de una plataforma web educativa que integra herramientas gratuitas de inteligencia artificial orientadas al fortalecimiento de competencias digitales y al desarrollo de un aprendizaje significativo en estudiantes de educación secundaria. En consecuencia, el estudio contribuye tanto al conocimiento científico sobre la percepción y uso de la Inteligencia Artificial en el contexto escolar como al desarrollo de estrategias tecnológicas que pueden favorecer la innovación y el fortalecimiento de los procesos de enseñanza y aprendizaje.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Para el desarrollo de esta investigación se empleó un enfoque cuantitativo, sustentado en un diseño no experimental, transversal y descriptivo-correlacional. Este diseño facilitó el análisis del conocimiento, el uso de la inteligencia artificial en estudiantes de educación secundaria, permitiendo identificar patrones de comportamiento y asociaciones entre las variables estudiadas.

La investigación se planteó con un alcance descriptivo y exploratorio, ya que permitió caracterizar el nivel de interacción de los estudiantes con las herramientas de inteligencia artificial, así como identificar las condiciones de acceso a los recursos tecnológicos disponibles en el entorno escolar.

El diseño transversal permitió recopilar la información en un momento especifico temporal, permitiendo evaluar la percepción y la experiencia de los estudiantes respecto al uso de tecnologías basadas en Inteligencia Artificial en contextos escolares como extraescolares.

2.1 Población y Muestra

La población de estudio de la investigación correspondió a 360 estudiantes matriculados en la Escuela Secundaria Técnica No. 47 “José Santos Valdez García”, ubicada en el Ejido Corona, Matamoros, Coahuila, pertenecientes a los grados primero, segundo y tercero de educación secundaria.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID036

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Se seleccionó una muestra de 131 estudiantes mediante un muestreo aleatorio simple. La distribución se aplicó a 44 estudiantes de primer grado, 43 de segundo y 44 de tercer grado, lo que permitió garantizar la representatividad de los participantes y reducir posibles sesgos de selección.
La distribución de la muestra de estudio se resume en la Tabla 1, donde se observa la cantidad de estudiantes de educación secundaria participantes, estos fueron clasificados según el grado escolar correspondiente.

Tabla 1
Grado de aplicación de instrumento

Grado	Hombres	Mujeres	Total
Primero	23	21	44
Segundo	22	21	43
Tercero	25	19	44

Para la aplicación del instrumento se estableció como criterio que los participantes estuvieran inscritos oficialmente en la institución educativa, además de que aceptaran participar de manera voluntaria y contaran con la autorización institucional correspondiente para la aplicación del instrumento y la realización del estudio.

2.2 Instrumento de recolección de datos

La recolección de la información se realizó mediante un instrumento compuesto por preguntas cerradas, organizado en cuatro dimensiones orientadas a evaluar el conocimiento sobre la inteligencia artificial, la accesibilidad tecnológica, el uso digital y la percepción de esta tecnología en el contexto educativo.

El instrumento se diseñó utilizando una escala de tipo Likert con cinco categorías de respuesta: 1 = totalmente en desacuerdo, 2= en desacuerdo, 3 = ni de acuerdo ni en desacuerdo, 4 = de acuerdo y 5 = totalmente de acuerdo.
Como parte del proceso de validación, el instrumento fue aplicado inicialmente a una prueba piloto para evaluar la confiabilidad del estudio entre las variables analizadas mediante el coeficiente alfa de Cronbach. El valor obtenido, $\alpha = 0.87$, indicó un nivel satisfactorio, lo que permitió garantizar la confiabilidad del instrumento para su aplicación definitiva.

2.3 Procesamiento y análisis de los datos obtenidos

Una vez recopilada la información, el procesamiento de los datos se realizó en tres etapas principales: codificación y captura de los datos, procesamiento estadístico mediante IBM SPSS Statistics y análisis e interpretación de los resultados obtenidos

1. Recolección y organización de datos

La información obtenida mediante las encuestas fue registrada y organizada en bases de datos digitales para facilitar su procesamiento estadístico.

2. Análisis estadístico

Los datos fueron procesados con el software IBM SPSS Statistics, versión 26. El análisis incluyó el cálculo de porcentajes, frecuencias, medias, desviaciones estándar y pruebas para evaluar la asociación entre las variables de estudio.
Este análisis permitió identificar patrones de comportamiento, tendencias y asociaciones entre las variables de estudio, aportando evidencia sobre el conocimiento, el uso y percepción de la inteligencia artificial en estudiantes de educación secundaria.

3. Presentación e interpretación de los resultados

La presentación de los resultados se realizó mediante tablas, gráficas e interpretaciones analíticas, lo que facilitó la comparación de resultados y la identificación de hallazgos relevantes para el objeto de esta investigación.
Como parte de la propuesta de intervención tecnológica derivada de los resultados obtenidos, se diseñó e implementó una plataforma web educativa orientada al acceso a herramientas gratuitas de inteligencia artificial, con el propósito de fortalecer competencias digitales y promover el aprendizaje significativo de estudiantes en educación secundaria.
La plataforma web fue desarrollada mediante una arquitectura tecnológica compuesta por HTML, CSS y JavaScript para el desarrollo de la interfaz de usuario; para el backend, se implementó PHP/Node.js; una base de datos, MySQL; y el hospedaje en la infraestructura web institucional. Entre sus principales funcionalidades destacan el acceso organizado a herramientas de inteligencia artificial, la clasificación de recursos por categorías educativas y el apoyo a las actividades académicas. Asimismo, la plataforma ofrece acceso gratuito, una interfaz intuitiva y una navegación accesible, lo que favorece una experiencia de uso sencilla y eficiente para los estudiantes. La Figura 1 muestra el análisis de la propuesta, desarrollada como modelo de integración de inteligencia artificial, diseñada para favorecer una interacción eficiente entre el usuario y los procesos de aprendizaje en el entorno educativo.

Figura 1
Modelo de integración de IA



2.4 Arquitectura general de la plataforma

La plataforma web educativa fue desarrollada bajo una arquitectura cliente-servidor de tres capas, lo que permite la interacción entre los usuarios, la lógica del sistema y el almacenamiento de la información.
La arquitectura implementada facilita la gestión de contenidos educativos y el acceso organizado a herramientas de inteligencia artificial, lo que contribuye a mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje de los estudiantes de educación secundaria.
El sistema permite que los usuarios accedan mediante navegadores web desde distintos dispositivos con conexión a internet, lo que favorece la accesibilidad y la compatibilidad multiplataforma.

A. Capa *de* presentación

La capa de presentación constituye la interfaz de interacción entre el usuario y la plataforma web. Su desarrollo se realizó mediante interfaces web desarrolladas con HTML5, CSS3, JavaScript, y ASP.NET. Esta capa permite navegar por la plataforma y acceder a las distintas categorías de herramientas educativas basadas en inteligencia artificial.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID036

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

B. Capa lógica o de negocio

Esta capa está implementada en C# y procesa las solicitudes de usuarios, validaciones, administración de recursos y organización de contenidos educativos. Asimismo, controla el flujo de navegación y la funcionalidad general de la plataforma.

C. Capa de datos

Es la encargada del almacenamiento y la administración de la información mediante SQL Server, lo que le permite gestionar categorías, almacenar recursos, administrar enlaces y organizar contenidos educativos disponibles en la plataforma.

La arquitectura propuesta facilita el acceso organizado de los estudiantes a herramientas de inteligencia artificial identificadas como potencialmente útiles durante el diagnóstico realizado mediante encuestas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La muestra de estudio estuvo constituida por 131 estudiantes inscritos en la Escuela Secundaria Técnica No. 47 “José Santos Valdez García”, pertenecientes a los grados primero, segundo y tercero de educación secundaria.

Los resultados evidenciaron un alto nivel de conectividad entre los estudiantes, donde el 85.5 % manifestó utilizar internet diariamente, lo que refleja una presencia constante de tecnologías digitales dentro de su entorno cotidiano. Asimismo, los resultados obtenidos durante la implementación y análisis del estudio se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Frecuencia de uso de internet

Uso	Frecuencia	Porcentaje
Diario	112	85.5%
Una vez por semana	13	9.9%
3 veces por semana	6	4.6%

Se identificó que el 44.3% de los estudiantes manifestó conocer qué es la inteligencia artificial, mientras que el 42.7% señaló haber escuchado sobre el tema, evidenciando un nivel de conocimiento importante de familiarización con tecnologías emergentes. Los datos correspondientes se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Conocimiento de la Inteligencia Artificial en la población estudiada

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Sí	58	44.3%
He escuchado algo	56	42.7%
No	17	13.0%

Como se observa en la Tabla 4, el 72.5 % de los estudiantes indicó haber utilizado herramientas basadas en inteligencia artificial como ChatGPT, Siri o Alexa, lo que demuestra una interacción significativa con tecnologías digitales inteligentes dentro de la población estudiada.

Tabla 4

Frecuencia de uso de herramientas de Inteligencia Artificial

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Sí	95	72.5%
No	36	27.5%

Como se observa en la Tabla 5, los resultados evidencian una percepción favorable hacia la incorporación de la inteligencia artificial en el ámbito educativo, donde el 79.4 % de los estudiantes manifestó estar de acuerdo o totalmente de acuerdo en aprender sobre esta tecnología en la escuela.

Tabla 5

Percepción sobre el aprendizaje de IA en la escuela

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Totalmente de acuerdo	53	40.5%
De acuerdo	51	38.9%
Neutral	23	17.6%
En desacuerdo	2	1.5%
Totalmente en desacuerdo	2	1.5%

Derivado de los resultados obtenidos durante el diagnóstico, se diseñó e implementó una plataforma web educativa desarrollada en C# y ASP.NET, orientada al acceso organizado a herramientas gratuitas de inteligencia artificial para estudiantes de educación secundaria. Las principales funcionalidades de la plataforma se describen en la Tabla 6.

Tabla 6

Funciones principales de la plataforma web educativa

Funcionalidad	Descripción
Acceso IA	Herramientas gratuitas
Categorías educativas	Matemáticas, idiomas, redacción
Navegación web	Interfaz amigable
Compatibilidad	Acceso desde dispositivos móviles

Como parte de la propuesta tecnológica derivada de la investigación, se diseñó e implementó una plataforma web educativa desarrollada en C# y ASP.NET, orientada al acceso organizado de herramientas gratuitas de inteligencia artificial para estudiantes de educación secundaria.

La plataforma fue diseñada con una interfaz intuitiva y adaptable, lo que permite a los estudiantes navegar por diferentes categorías educativas relacionadas con el aprendizaje personalizado, la escritura académica, las matemáticas, los idiomas y la creatividad.

La Figura 2, muestra la interfaz principal de la plataforma, diseñada para facilitar el acceso rápido a herramientas de inteligencia artificial organizadas por categorías educativas. El sistema incorpora un entorno visual interactivo orientado a mejorar la experiencia del usuario y fortalecer el aprendizaje digital.

Figura 2

Página principal



La plataforma organiza las herramientas de inteligencia artificial en categorías educativas específicas (Figura 3), lo que facilita a los estudiantes localizar recursos de acuerdo con sus necesidades académicas y áreas de aprendizaje.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID036

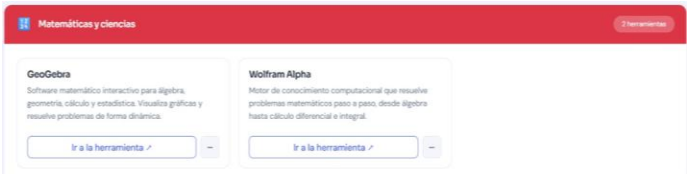
This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 3
Categorías educativas integradas dentro de la plataforma



La Figura 4 muestra el módulo de matemáticas y ciencias, el cual integra herramientas de apoyo para álgebra, geometría, cálculo y resolución de problemas matemáticos mediante plataformas basadas en inteligencia artificial.

Figura 4
Módulo de herramientas para matemáticas y ciencias



El módulo de escritura y comprensión, como se muestra en la Figura 5, incorpora asistentes de inteligencia artificial orientados al fortalecimiento de habilidades de redacción, comprensión textual y apoyo académico.

Figura 5
Herramientas orientadas al desarrollo de escritura y comprensión



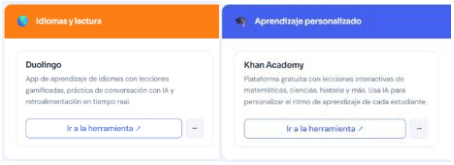
La plataforma también integra herramientas enfocadas al desarrollo de creatividad y pensamiento crítico, permitiendo a los estudiantes generar mapas mentales, materiales visuales y contenidos educativos digitales, como lo muestra la Figura 6.

Figura 6
Herramientas de creatividad y pensamiento crítico



La Figura 7 muestra herramientas educativas basadas en aprendizaje adaptativo, orientadas al fortalecimiento del aprendizaje autónomo, de los idiomas y del seguimiento personalizado del progreso académico.

Figura 7
Herramientas para aprendizaje personalizado e idiomas



A continuación, en la Tabla 7, se muestran las funcionalidades implementadas en la plataforma.

Tabla 7
Funcionalidades de la plataforma

Categoría	Herramientas integradas	Objetivo educativo
Aprendizaje personalizado	Khan Academy	Aprendizaje adaptativo
Escritura y comprensión	ChatGPT, Grammarly	Redacción académica
Matemáticas y ciencias	GeoGebra, WolframAlpha	Resolución de problemas
Idiomas y lectura	Duolingo	Competencias lingüísticas
Creatividad	Canva, MindMeister	Pensamiento creativo

Los resultados indican un elevado nivel de acceso a internet y dispositivos móviles entre los estudiantes, lo que concuerda con la evidencia científica reciente sobre el crecimiento de la conectividad digital como elemento clave para la incorporación de tecnologías en el contexto educativo.

El nivel de conocimiento identificado evidencia que los estudiantes mantienen un contacto constante con tecnologías emergentes, en particular con herramientas de IA generativa como ChatGPT, Siri y Alexa.

A pesar del acceso tecnológico y del interés mostrado por los estudiantes en la inteligencia artificial, su incorporación en las actividades escolares sigue siendo limitada. Este resultado evidencia la necesidad de fortalecer las estrategias didácticas que promuevan el uso educativo de estas tecnologías, lo que justifica el desarrollo de recursos como la plataforma web propuesta en esta investigación.

En respuesta a las necesidades identificadas, se desarrolló una plataforma web educativa en C# y ASP.NET orientada al acceso organizado de herramientas gratuitas de inteligencia artificial, buscando fortalecer competencias digitales y promover el aprendizaje significativo.

Los resultados de la presente investigación evidencian que los estudiantes de educación secundaria mantienen una interacción constante con tecnologías digitales y herramientas relacionadas con la inteligencia artificial (IA). El alto porcentaje de estudiantes con acceso frecuente a internet y a dispositivos móviles demuestra que existe una infraestructura tecnológica básica favorable a la incorporación de herramientas digitales en el proceso educativo. Estos hallazgos coinciden con lo señalado por (Carina S. González, 2023), quien menciona que el crecimiento tecnológico ha transformado la manera en que los

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID036

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

estudiantes acceden a la información y participan en entornos digitales de aprendizaje.

Asimismo, los resultados muestran que una proporción considerable de estudiantes conoce o ha oído hablar de herramientas de inteligencia artificial, particularmente aquellas relacionadas con asistentes virtuales y sistemas de IA generativa. Esto refleja que las nuevas generaciones mantienen un contacto constante con tecnologías emergentes en su entorno cotidiano, lo que favorece el desarrollo de competencias digitales iniciales. En este sentido, Álvarez Sepúlveda (2023) señala que herramientas como ChatGPT han incrementado significativamente la interacción de los estudiantes con sistemas inteligentes capaces de brindar apoyo académico y acceso inmediato a la información.

Entre los principales hallazgos del estudio, se destaca que, a pesar del acceso a recursos tecnológicos y del conocimiento general que los estudiantes poseen sobre la inteligencia artificial, la integración de esta en las actividades escolares sigue siendo limitada. La mayoría de los participantes manifestó que estas herramientas se utilizan con poca frecuencia en las clases impartidas en la institución educativa. Este resultado sugiere que aún existe una brecha entre el acceso tecnológico de los estudiantes y la incorporación pedagógica de tecnologías emergentes en el aula.

Dicho hallazgo coincide con Loayza (2024), quien señala que, aunque la inteligencia artificial posee un amplio potencial educativo, su implementación en educación básica aún enfrenta desafíos relacionados con capacitación docente, estrategias didácticas y aprovechamiento pedagógico de las herramientas tecnológicas.

De igual manera, (Cruz, Benites, Cachinelli, & Caicedo, 2023) mencionan que la integración efectiva de la IA en la enseñanza requiere modelos educativos que permitan utilizar estas tecnologías como apoyo al aprendizaje significativo y no únicamente como herramientas de consulta o de generación automática de contenido.

Otro aspecto importante identificado en la investigación es la percepción positiva de los participantes respecto al uso de la inteligencia artificial en el ámbito educativo. La mayoría de los participantes manifestó interés en aprender más sobre estas tecnologías e incorporarlas a las actividades escolares. Esto evidencia una disposición favorable hacia modelos educativos apoyados en herramientas digitales inteligentes, lo que representa una oportunidad importante para el desarrollo de nuevas estrategias de enseñanza orientadas al fortalecimiento de competencias digitales y al aprendizaje autónomo.

Derivado de los resultados obtenidos, se diseñó e implementó una plataforma web educativa desarrollada en C# y ASP.NET, orientada al acceso organizado a herramientas gratuitas de inteligencia artificial para estudiantes de educación secundaria. La propuesta tecnológica surge como una estrategia de intervención educativa destinada a reducir las limitaciones identificadas durante el diagnóstico, en particular las relacionadas con el desconocimiento de las aplicaciones educativas de IA y la limitada integración tecnológica en el aula.

La plataforma desarrollada permite clasificar herramientas de inteligencia artificial por áreas académicas, facilitando el acceso a recursos relacionados con matemáticas, redacción, idiomas, investigación y apoyo escolar. De esta manera, el sistema busca promover el uso responsable y educativo de tecnologías basadas en inteligencia artificial, favoreciendo el fortalecimiento de competencias digitales y del aprendizaje significativo en estudiantes de educación secundaria.

Finalmente, el análisis de los resultados permite concluir que la inteligencia artificial constituye un recurso tecnológico con un alto potencial para fortalecer los procesos de enseñanza y aprendizaje en la educación básica. No obstante, su aprovechamiento depende de la implementación de estrategias didácticas que favorezcan la integración en el aula y del desarrollo de recursos tecnológicos que faciliten su uso por parte de docentes y estudiantes, transformando el acceso tecnológico en verdaderas oportunidades de aprendizaje.

IV. CONCLUSIONES

La presente investigación permitió evaluar el nivel de conocimiento, utilización y la percepción de la Inteligencia Artificial en estudiantes de educación secundaria de la Escuela Secundaria Técnica No. 47 “José Santos Valdez García”, identificando aspectos relevantes relacionados con el acceso tecnológico, la interacción con herramientas digitales y las oportunidades de integración de la IA dentro del entorno educativo.

Los resultados de la investigación muestran que la mayoría de los estudiantes cuenta con acceso frecuente a internet y a dispositivos móviles, lo que evidencia condiciones tecnológicas favorables para la integración de tecnologías digitales como apoyo a los procesos de enseñanza y aprendizaje.

Asimismo, se identificó que una proporción importante de estudiantes posee conocimientos básicos o familiaridad con conceptos de inteligencia artificial, particularmente mediante el uso de herramientas populares como asistentes virtuales y sistemas de IA generativa.

Sin embargo, uno de los principales hallazgos de la investigación es que, a pesar del acceso tecnológico y del interés mostrado por los estudiantes, la integración de herramientas basadas en inteligencia artificial en las actividades realizadas en el aula sigue siendo limitada. La mayoría de los participantes señaló que estas tecnologías no se utilizan con frecuencia en las actividades escolares, lo que evidencia una brecha entre el avance tecnológico y su integración pedagógica en la educación secundaria.

Los resultados evidenciaron una disposición favorable de los estudiantes hacia la incorporación de tecnologías emergentes en el ámbito educativo. Los participantes manifestaron interés en aprender más sobre estas tecnologías y consideraron que podrían contribuir al fortalecimiento del aprendizaje, a la resolución de tareas y al acceso a información académica. Estos resultados reflejan la disposición estudiantil hacia modelos educativos basados en tecnologías emergentes.

Como respuesta a las necesidades identificadas durante el diagnóstico, se diseñó e implementó una plataforma web educativa desarrollada en C# y ASP.NET, orientada al acceso organizado a herramientas gratuitas de inteligencia artificial para estudiantes de educación secundaria.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID036

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La plataforma representa una propuesta tecnológica orientada al fortalecimiento de las competencias digitales y al aprovechamiento responsable de la IA en contextos educativos.
Los resultados obtenidos permiten concluir que la inteligencia artificial representa una alternativa tecnológica con capacidad para fortalecer los procesos educativos en la educación básica; no obstante, su implementación efectiva requiere estrategias pedagógicas adecuadas, capacitación tecnológica y recursos digitales que permitan integrar estas herramientas de manera responsable y significativa en el contexto escolar.
Como línea de investigación futura, se considera necesario profundizar en el estudio de la integración de la inteligencia artificial en la educación secundaria, en particular mediante investigaciones que evalúen su impacto en el aprendizaje, el rendimiento académico, el desarrollo de competencias digitales y la implementación de estrategias didácticas orientadas a fortalecer los procesos de enseñanza y aprendizaje.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Escuela Secundaria Técnica No. 47 “José Santos Valdez García”, ubicada en el Ejido Corona, Matamoros, Coahuila, por el apoyo institucional y las facilidades otorgadas para la realización de la presente investigación. Asimismo, se agradece la valiosa participación de los estudiantes y docentes, cuya colaboración permitió la aplicación del instrumento y la recopilación de la información utilizada en este estudio.

VI. REFERENCIAS

Achuthan, K. (2025). Artificial intelligence and learner autonomy: A meta-analysis of self-regulated and self-directed learning. *Frontiers in Education*. https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1738751

Álvarez Sepúlveda, H. (2023). La inteligencia artificial como catalizador en la enseñanza de la historia: Retos y posibilidades pedagógicas. Revista Docentes 2.0. https://doi.org/10.37843/rted.v16i2.426

Ang, J. W., Ng, Y. N., Lee, L. H.-W., & Yong, J. Y. (2024). Exploring students' learning experience and engagement in asynchronous learning using the Community of Inquiry Framework through educational design research. Education Sciences. https://doi.org/10.3390/educsci14030215

Bolaño García, M., & Duarte Acosta, N. (2024). A systematic review of the use of artificial intelligence in education. Revista Colombiana de Cirugía. Ética y Educación, 39(1), 51–63. https://doi.org/10.30944/20117582.2365

Carina S. González, G. (2023). El impacto en la inteligencia artificial en la educación: Transformación de la forma de enseñar y aprender. Qurriculum. https://doi.org/10.25145/j.qurricul.2023.36.03

Crompton, H., & Burke, D. (2023). Artificial intelligence in higher education: The state of the field. International Journal of Educational Technology in Higher Education. https://doi.org/10.1186/s41239-023-00392-8

Cruz, M. A., Benites, E. M., Cachinelli, C. G., & Caicedo, E. V. (2023). Incidencias de la inteligencia artificial en la educación. Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento. https://doi.org/10.26820/recimundo/7.(2).jun.2023.238-251

Fombona, J., Sáez, J. M., & Sánchez, S. (2025). Artificial intelligence and robotics in education: Advances, challenges, and future perspectives. Social Sciences & Humanities Open. https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2025.101533

Hong, J., & Kim, K. (2025). Impact of AIoT education program on digital and AI literacy of elementary school students. Education and Information Technologies, 107–130. https://doi.org/10.1007/s10639-024-12758-0

Kasneci, E., Sessler, K., Küchemann, S., Bannert, M., Dementieva, D., Fischer, F., … Oleksandr. (2023). ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. Learning and Individual Differences. https://doi.org/10.1016/j.lindif.2023.102274

Lee, D., Arnold, M., Srivastava, A., Plastow, K., Strelan, P., Ploeckl, F., … Palmer, E. (2024). The impact of generative AI on higher education learning and teaching: A study of educators' perspectives. Computers and Education: Artificial Intelligence. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100221

Loayza, K. V. (2024). Transformando la educación básica: Retos y perspectivas de la inteligencia artificial. Revista Científica de Salud y Desarrollo Humano. https://doi.org/10.61368/r.s.d.h.v5i2.113

Miao, F., Holmes, W., Huang, R., & Zhang, H. (2021). AI and education: Guidance for policy-makers. https://doi.org/10.54675/PCSP7350

Minga, C. C., & You, L. Y. (2020). Developing a computer-mediated communication competence forecasting model based on learning behavior features. Computers and Education: Artificial Intelligence. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2020.100001

Molenaar, I. (2022). The concept of hybrid human-AI regulation: Exemplifying how to support young learners' self-regulated learning. Computers and Education: Artificial Intelligence. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100070

Tlili, A., Shehata, B., Adarkwah, M. A., Bozkurt, A., Hickey, D. T., & Agyemang, R. H. (2023). What if the devil is my guardian angel: ChatGPT as a case study of using chatbots in education. Smart Learning Environments. https://doi.org/10.1186/s40561-023-00237-x

Uyar, A., Karafil, B., & Karakuyu, A. (2026). Artificial intelligence dependency among educators: A scale development and validation study. https://doi.org/10.1007/s10639-025-13862-5

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización [Conceptualization]	Jonatan Leonel Montelongo Bocanegra
2	Curación de datos [Data curation]	Jonatan Leonel Montelongo Bocanegra
3	Análisis formal [Formal analysis]	Martha Iveth Ojeda Núñez
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Martha Iveth Ojeda Núñez Víctor Andrés Ramírez Sánchez José Eduardo Gutiérrez Montoya Lorena Elizabeth Jurado Bichir
5	Investigación [Investigation]	Jonatan Leonel Montelongo Bocanegra
6	Methodología [Methodology]	Martha Iveth Ojeda Núñez
7	Administración del proyecto [Project administration]	Martha Iveth Ojeda Núñez
8	Recursos [Resources]	Víctor Andrés Ramírez Sánchez
9	Software [Software]	Jonatan Leonel Montelongo Bocanegra
10	Supervision [Supervision]	Víctor Andrés Ramírez Sánchez
11	Validación [Validation]	José Eduardo Gutiérrez Montoya
12	Visualización [Visualization]	Lorena Elizabeth Jurado Bichir
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Martha Iveth Ojeda Núñez
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Martha Iveth Ojeda Núñez Víctor Andrés Ramírez Sánchez José Eduardo Gutiérrez Montoya Lorena Elizabeth Jurado Bichir Jonatan Leonel Montelongo Bocanegra

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID036

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Diseño, Ensamble y Validación Preliminar de un Microsensor Térmico ToF en Tecnología TFS20 para Aplicaciones Hidrométricas

Design, assembly, and preliminary validation of a thermal ToF microsensor in TFS20 technology for hydrometric applications

Coto-Fuentes, H.[1]; González-Aroña, I.S.[2] ✉; Guevara-Amatón, K.V.[3]

Datos de Adscripción:

[1] Coto Fuentes, Hesner
Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de La Laguna. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Torreón, Coahuila, México.
hesnercf@lalaguna.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9548-7864

[2]✉ González Aroña, Itzel Sarahim
Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de La Laguna. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Torreón, Coahuila, México.
m.isgonzalez@lalaguna.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3528-3651

[3] Guevara Amatón, Karla Victoria
Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de La Laguna. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Torreón, Coahuila, México.
kvguevaraa@correo.itlalaguna.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2894-4861

Resumen **- La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un sensor para medir el caudal en canales a cielo abierto, evitando los arrastres hidrodinámicos generados por las hélices de los medidores de molinete convencionales. Para ello, se propone un dispositivo basado en el principio de tiempo de vuelo (ToF), concebido como una alternativa compacta, robusta y sin partes móviles. El desarrollo se realizó empleando la tecnología TFS20 (Tecnología de Película Delgada de 20 µm), desarrollada en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), a partir del diseño microelectrónico de un chip con un área preliminar de 5 × 5 mm, conforme a las reglas de manufactura establecidas para dicha tecnología. Posteriormente, se fabricó el dispositivo y se realizó su caracterización eléctrica y de funcionamiento en un banco de pruebas, bajo condiciones controladas, en un rango de microflujos de 60 a 90 µL/min, con el propósito de validar experimentalmente el diseño teórico propuesto. Los resultados obtenidos permitieron confirmar la validez del layout mediante una regresión lineal con $R^2 = 0.9556$, verificar el comportamiento eléctrico del dispositivo y de sus elementos constitutivos, así como corroborar la respuesta esperada del sensor bajo condiciones de operación, con un error absoluto máximo de 4.56 µL/min en el incremento de flujo. Asimismo, en las pruebas de repetibilidad a un caudal constante de 70 µL/min, el tiempo de vuelo se estableció en 51.13 ms tras aplicar el filtrado estadístico. Este desarrollo se plantea para su integración en la plataforma hidrométrica KFORO, orientada al monitoreo de caudal en canales a cielo abierto, lo que vincula el diseño del sensor con una aplicación tecnológica específica para la gestión eficiente del recurso hídrico.**

Palabras Clave **- Medición de caudal, Microelectrónica, Microfabricación, Sensor de flujo, TFS20, Tiempo de vuelo.**

Abstract **- This research aims to develop a sensor for measuring flow in open channels, avoiding the hydrodynamic drag generated by the propellers of conventional turbine-type meters. To achieve this goal, we propose a device based on the Time-of-Flight (ToF) principle as a compact, robust alternative with no moving parts. The development was undertaken using TFS20 Technology (20 µm Thin Film Technology) at the public research institution Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), based on the microelectronic design of a chip with a preliminary area of 5 × 5 mm, following the previously established manufacturing rules for this technology. Subsequently, the device was manufactured, and its electrical and operational characterization was carried out on a test bench under controlled microflow conditions ranging from 60 to 90 µL/min, to experimentally validate the proposed theoretical design. The results obtained confirmed the validity of the layout via a linear regression with $R^2 = 0.9556$, verified the electrical behavior of the device and its constituent elements, and corroborated the expected response of the sensor under operating conditions with a maximum absolute error of 4.56 µL/min under increasing flow. Furthermore, in repeatability tests at a constant flow rate of 70 µL/min, the flight time was established at 51.13 ms after applying statistical filtering. This development is intended for integration into the hydrometric platform KFORO, designed for flow monitoring in open channels, thus linking the sensor design to a specific technological application related to the efficient management of water resources.**

Keywords **- Flow measurement, flow sensor, microelectronics, microfabrication, TFS20, Time of flight.**

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de microsensores de flujo ha cobrado una relevancia importante en distintas aplicaciones, tanto industriales como bioquímicas y agrícolas, debido a la necesidad de medir caudales con alta precisión, un consumo energético mínimo y tamaño reducido. En el ámbito de las técnicas de medición, los sensores basados en el principio de Tiempo de Vuelo (Time of Flight, "ToF") resaltan por su capacidad de calcular la velocidad de un fluido mediante el desplazamiento temporal de una perturbación térmica a lo largo de un canal. El método ToF consiste en generar un pulso térmico mediante un calentador y detectar posteriormente el frente de calor con sensores colocados aguas abajo, utilizando la diferencia de tiempo entre la

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID038

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

emisión y la detección para calcular la velocidad del flujo. Esta técnica presenta ventajas frente a métodos calorimétricos tradicionales debido a su mayor linealidad y menor dependencia a las propiedades térmicas del fluido. (Huang, 2022). Asimismo, las revisiones en el campo microelectrónico validan la alta sensibilidad de las aleaciones metálicas sobre sustratos aislados (Kuo, Yu & Meng, 2012). De este modo, las múltiples aplicaciones actuales demuestran que la generación de pulsos térmicos transitorios permite obtener lecturas precisas en conductos aptos para microfluídica (Lintel et al., 2011), mientras que el modelado matemático de flujos de baja velocidad valida que la sensibilidad a la dispersión calórica disminuye con la optimización geométrica de las pistas (Panhans et al., 2010).

En el presente estudio se propone el diseño y caracterización de un microsensor térmico basado en la tecnología Tiempo de Vuelo, fabricado mediante el proceso TFS20 desarrollado en el Laboratorio Nacional de Micro y Nano Tecnologías del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). El equipo funciona generando un pulso térmico breve mediante un calefactor resistivo de níquel, cuya disipación térmica se produce por efecto Joule. La potencia que genera el calentador se establece mediante la relación $P = I^2R$, mientras que la corriente eléctrica suministrada al sistema se obtiene a partir de la Ley de Ohm (Alexander y Sadiku, 2013). A continuación, los sensores RTD dispuestos aguas abajo detectan el movimiento de la onda térmica arrastrada por el flujo, lo que permite determinar la velocidad media del fluido a partir del tiempo de vuelo térmico.
El diseño microelectrónico toma en cuenta las limitaciones de fabricación impuestas por el proceso TFS20, que abarcan dimensiones mínimas, grosores de película delgada y parámetros eléctricos de los materiales resistivos. De igual manera, se consideraron diferentes técnicas de soldadura y encapsulado para asegurar la continuidad eléctrica y el aislamiento del dispositivo durante su operación, al estar en contacto con agua. El encapsulado en microsistemas no solo proporciona soporte mecánico, sino también protección contra la humedad y factores externos que pueden comprometer la fiabilidad del dispositivo (Tummala, 2001). Bajo este enfoque, se implementó un encapsulado con resina UV (marca Resin-T) para garantizar la integridad funcional del microsensor.

Adicionalmente, para el funcionamiento óptimo de los microsensores térmicos, se requieren sistemas de acondicionamiento de señal capaces de captar variaciones eléctricas de baja magnitud con alta estabilidad y precisión. Para esto, se hizo uso de un dispositivo PSoC 5LP (Cypress Semiconductor, CY8C58LP), que integra bloques analógicos programables y módulos digitales apropiados para aplicaciones de adquisición de datos compactas de alta resolución (Infineon Technologies, 2023). El sistema diseñado permite monitorear las variaciones de resistencia de los sensores RTD a partir del desplazamiento del pulso térmico en el fluido.
De igual manera, se introdujo una fuente de corriente constante para reducir los errores asociados al sobrecalentamiento del sensor y optimizar la estabilidad de la lectura eléctrica. La digitalización de la señal se realizó mediante un convertidor analógico-digital de 16 bits con muestreo continuo, lo que permitió detectar pequeñas variaciones de voltaje asociadas al frente. Finalmente, la detección del tiempo de vuelo se realizó mediante un monitoreo en tiempo real basado en un umbral diferencial respecto a una línea base previamente definida, una estrategia que se utiliza comúnmente en sistemas de detección térmica para reducir las falsas detecciones y optimizar la fiabilidad en la recolección de datos (Infineon Technologies, 2023).

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Fundamentos teóricos y modelado matemático

El diseño del microsensor se basa en el principio de operación ToF (Time-of-Flight), en el que se genera un pulso eléctrico que provoca un aumento de temperatura en el calentador, el cual, a su vez, es detectado por un sensor de temperatura tipo RTD en la parte inferior. La diferencia de tiempo entre la emisión de la onda de calor y su detección por el sensor resistivo puede utilizarse para medir el caudal (Rodrigues & Furlan, 2009).
El sensor funciona cuando un breve pulso térmico es generado por un calentador resistivo elaborado a partir de níquel. Mediante la ley de calentamiento de Joule (Alexander & Sadiku, 2013), se determina la potencia de disipación térmica (P) generada por dicho pulso, expresada en (1).

$$P = I^2R \tag{1}$$

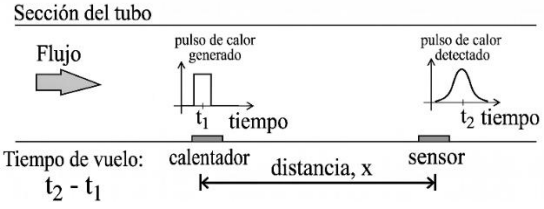
Donde I es la intensidad de corriente suministrada al elemento y R corresponde a la resistencia eléctrica. Haciendo uso de la Ley de Ohm (Alexander & Sadiku, 2013) en (2) se obtiene la intensidad de corriente en el dispositivo.

$$V = R * I \tag{2}$$

Con una fuente de alimentación a 3.3 volts y una resistencia aproximada de 300 Ω, el valor correspondiente a la corriente eléctrica es de 11 mA, logrando una disipación máxima de 36.3 mW en el diseño propuesto, para las pruebas experimentales se utilizó una potencia real de 7.5 mW con el fin de garantizar la estabilidad del dispositivo.
El impulso es arrastrado por el flujo hacia los sensores de temperatura de tipo RTD, situados aguas abajo. Estos miden la diferencia de tiempo existente entre la generación del pulso térmico (t_1) y la detección del frente térmico de calor en el sensor receptor (t_2)(Panhans et al., s. f.). Esa diferencia de tiempo, mostrada en (3), se denomina tiempo de vuelo (Rodrigues & Furlan, 2009).

$$\Delta = t_2 - t_1 \tag{3}$$

Figura 1
Medición de caudal mediante principio de Tiempo de Vuelo.



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID038

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Luego de obtener el dato del tiempo de vuelo térmico (Δt) y con el conocimiento de la distancia de separación física (L) entre el calentador y el sensor situado aguas abajo, la velocidad media del fluido se calcula a partir de (4):

$$v = \frac{L}{\Delta t} \tag{4}$$

Al determinar el área de sección transversal (A) correspondiente al canal de riego o la manguera acoplada al sensor por donde circula el fluido, en (4) se calcula el caudal (Q) mediante la ecuación de continuidad (Cengel & Cimbala, 2018).

$$Q = v * A = \frac{L}{\Delta t} * A \tag{5}$$

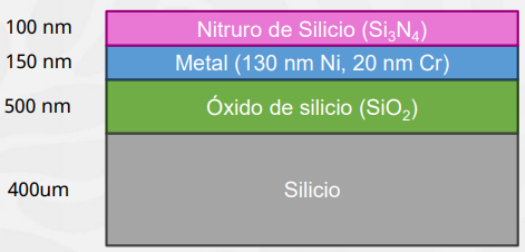
El uso de ecuaciones matemáticas para obtener el flujo en determinados medios, garantizan que los datos proporcionados por los sensores de tiempo de vuelo faciliten el procesamiento de la señal del flujo al tratarse de dispositivos con menor dependencia respecto a variaciones moderadas de las propiedades térmicas del fluido, en comparación con configuraciones calorimétricas convencionales (Huang, 2022).

2.2. Diseño microelectrónico y especificaciones de manufactura

El proceso TFS20 (Tecnología de película delgada de 20 µm), desarrollado en el Laboratorio Nacional de Micro y Nano Tecnologías (LNunT) del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI, consiste en la elaboración de dispositivos del tipo resistivos y estructuras pasivas sobre sustratos de silicio sometidos a un tratamiento de oxidación (Sánchez & Chávez, 2025).

La Figura 2 muestra la arquitectura multicapa principal del dispositivo. La base está elaborada a partir de un sustrato de silicio (Si) de 400 µm de espesor sobre el cual se coloca una capa de dióxido de silicio (SiO_2) de 500 nm, esta actúa como aislante térmico y eléctrico. Posterior a ello, los elementos resistivos, las pistas de conexión interna y los pads de contacto se elaboran a partir de una aleación de 130 nm de níquel y 20 nm de cromo. Finalmente, el dispositivo es protegido con una fina capa de pasivación de 100 nm elaborada a partir de nitruro de silicio (Si_3N_4), la cual cuenta con aperturas específicas para permitir el acceso eléctrico a los pads de conexión (CIDESI, 2025).

Figura 2
Proceso de una capa metálica micrograbada.



La Tabla 1 muestra las especificaciones eléctricas y constantes que emplea la tecnología de película delgada, incluyendo parámetros como la resistencia por cuadro y las constantes dieléctricas. Estas constantes son de suma importancia para validar el modelo matemático del sensor y la predicción de las respuestas térmicas ante variaciones en el flujo

Tabla 1
Especificaciones técnicas proceso CIDESI TFS20

	Valor	Unidad
Resistencia por cuadro de metal	0.64	$\Omega/_{\square}$
Capacitancia entre pistas de metal sin nitruro	0.89	aF
Capacitancia entre pistas de metal con nitruro	7.5	aF
Coeficiente de temperatura de metal	0.00587	$C^{\circ-1}$
Constante dieléctrica de nitruro de silicio	8.5	Adimensional
Constante dieléctrica de óxido de silicio	3.9	Adimensional

Nota: Ω/□ representa ohms por cuadro. Las capacitancias reportadas corresponden a valores de referencia del proceso TFS20; su interpretación depende de la geometría específica de las pistas y de la configuración física del dispositivo.

El diseño geométrico (layout) del circuito se diseñó para conformar un chip con dimensiones finales de 5 x 5 mm. Para salvaguardar la integridad física del dispositivo y minimizar errores de fabricación, el diseño se apegó a las reglas de manufactura del proceso TFS20 (Sánchez & Chávez, 2025).

Entre las restricciones más importantes destaca que los elementos (ancho de pistas, espaciado y muescas) cumplieran con una dimensión mínima de 20 µm, además de evitar la colocación de componentes en el área delimitada como “región reservada” y se eludieron superposiciones innecesarias en los polígonos. Asimismo, se implementó un etiquetado riguroso a las estructuras como método para garantizar la identificación de las terminales eléctricas post procesado.

Tomando como base los requerimientos mencionados, se procedió al trazado de la distribución del microsensor empleando la herramienta de diseño KLayout. El sensor opera mediante la generación de un pulso térmico breve producido por un calefactor resistivo de níquel. El diseño contempla una potencia máxima estimada de 36.3 mW; sin embargo, durante las pruebas experimentales se utilizó una potencia real aproximada de 7.5 mW, con el propósito de reducir el estrés térmico y preservar la integridad física del dispositivo. Este pulso es arrastrado por el flujo a través del conducto, donde los elementos RTD posicionados aguas abajo permiten detectar la perturbación térmica y estimar la velocidad del fluido a partir del tiempo de vuelo.

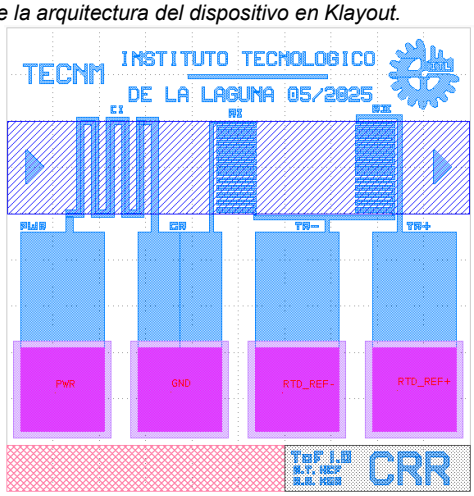
El calefactor presenta una resistencia aproximada de 300 Ω y fue diseñado para operar con un voltaje máximo de 3.3 V. De acuerdo con la Ley de Ohm, esta condición corresponde a una corriente máxima cercana a 11 mA. Los RTD, fabricados en níquel, presentan una resistencia eléctrica aproximada de 2.3 Ω. En la arquitectura original, ambos sensores se encuentran conectados en serie y alimentados mediante una fuente de corriente constante, utilizando el punto de unión como referencia o tap central. Esta configuración permite realizar mediciones diferenciales entre los extremos del conjunto, como se observa

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID038

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

en la Figura 3. No obstante, en la validación experimental reportada en este trabajo se utilizó un único receptor funcional, R1, debido a las limitaciones derivadas del proceso de encapsulado.

Figura 3
Diseño de la arquitectura del dispositivo en Klayout.



2.3. Integración física y ensamble del dispositivo

La instrumentación del diseño microelectrónico a un dispositivo funcional requiere una fase de integración física que se centra en la interconexión de los pads del chip hacia una placa de circuito impreso (PCB).

En la etapa inicial se evaluó el uso de una estación de aire caliente para realizar el proceso de soldadura. Sin embargo, este método presenta limitaciones técnicas: El flujo aire proyectado provoca el desprendimiento de los cables de conexión antes de la solidificación. Asimismo, la exposición del dispositivo a un flujo constante de temperatura elevada provoca daños irreversibles sobre la capa de pasivación de nitruro de silicio, además de provocar la oxidación prematura de las terminales de contacto.

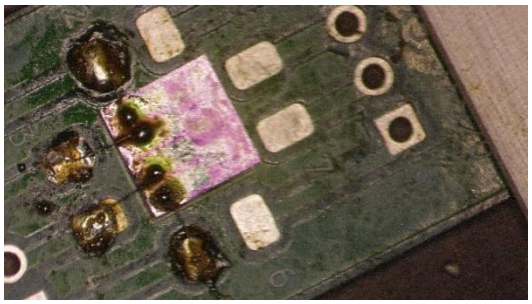
Debido a los problemas que presenta esta técnica, se propuso como una mejor alternativa el uso de una cama caliente para el proceso de soldadura. CIDESI recomienda una temperatura máxima de trabajo de 200 °C.

Si bien el estándar propuesto por CIDESI para este proceso es la pasta para soldar Multicore Loctite LF318, que resalta por su excelente adherencia y una mínima generación de residuos (Henkel Adhesive Technologies, 2023), presenta una notable dificultad de adquisición local. Se recurrió a experimentar con otras alternativas comerciales de más fácil acceso, y con aquellas disponibles en el laboratorio de trabajo.

Inicialmente se empleó soldadura de estaño en pasta *BAKU BK-5051,* la cual mantiene una temperatura de fusión de 183 °C elaborada a base de la aleación Sn_{63}/Pb_{37}, ideal para reparaciones de microchips de diferentes aparatos electrónicos, además de contar con características como secado rápido, limpieza con facilidad, leve detección de aroma y compatibilidad con otros tipos de soldadura (Ofiteck, s.f.).

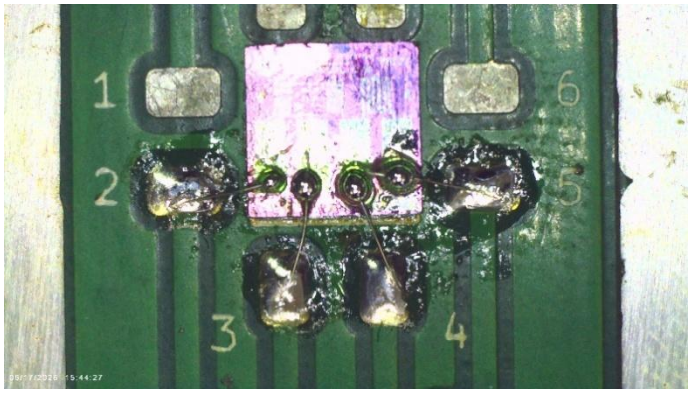
Al ser material disponible en el laboratorio de instrumentación electrónica, se desconoce si previamente se le incorporó algún tipo de flux, como se puede observar en la Figura 4, se generaron residuos que imposibilitaron el contacto entre terminales.

Figura 4
Proceso de soldadura en cama caliente utilizando estaño en pasta BAKU BK-5051.



En la segunda etapa se utilizó una soldadura en pasta de precisión en formato de mini jeringa, elaborada conforme el estándar IPC J-STD-006, su diseño permitió una dosificación controlada sobre los pads del microchip compartiendo con la soldadura en pasta BAKU BK-5051 los mismos estándares de aleación y temperatura de fusión (IPC, 2018a). Para esta prueba, la soldadura se fusionó con el flux *Mechanic UV 559 No-clean,* adecuada para evitar fugas eléctricas y cortocircuitos tras el residuo (IPC, 2008b). El uso de estos materiales en conjunto repercutió directamente en el acabado final con un enfoque negativo, el flux al calentarse creó una fina capa aislante de polímero que se fusionó con el níquel de los pads de conexión, como se observa en la figura 5, imposibilitando la comunicación además de provocar un daño permanente en las terminales.

Figura 5
Proceso de soldadura en cama caliente utilizando soldadura en pasta elaborada conforme el estándar IPC J-STD-006 en aleación con flux Mechanic UV 559.



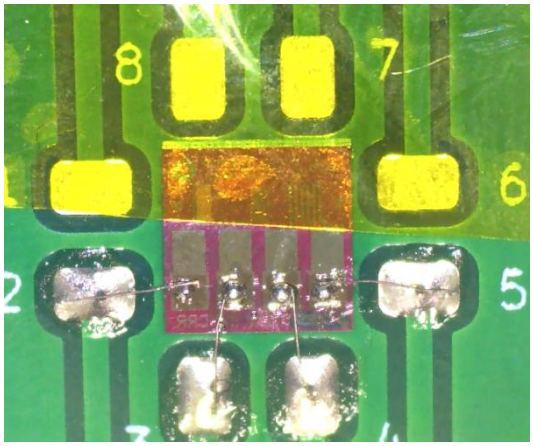
Con el fin de evitar complicaciones en el proceso de soldadura, se optó por evadir el uso de flux y utilizar la soldadura en pasta *Mechanic XGSP50* de uso industrial, esta destaca por poseer un tamaño de partícula de 3µm, valor adecuado para trabajar sobre dispositivos de tamaños microscópicos (Mechanic Precision Tools, 2024). Su composición y temperatura de fusión no difiere de pastas para soldar utilizadas en las pruebas anteriores, la diferencia radica en el uso de flux para preparar la superficie del chip.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID038

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Como se puede observar en la Figura 6, a diferencia de los otros procesos, priorizar el uso de soldadura sin algún aditamento extra garantizó la unión adecuada entre los contactos de níquel y el cable de conexión, el cual consistió en un filamento delgado de cobre y estaño extraído del laboratorio con un diámetro aproximado de 0.1 mm, además de tener un acabado estético más profesional

Figura 6
Proceso de soldadura en cama caliente utilizando soldadura en pasta Mechanic XGSP50 sin flux.



La Tabla 2 resume la comparativa entre los materiales evaluados durante la fase de caracterización del sensor. Se destaca que, ante la dificultad de adquirir el estándar sugerido por el fabricante, la opción preliminar para llevar a cabo el proceso es una soldadura en pasta cuyo tamaño de partícula se encuentre en un aproximado de 3 µm y la omisión de flux.

Tabla 2
Comparativa de soldaduras en pasta para la caracterización de microchips fabricados en tecnología TFS20

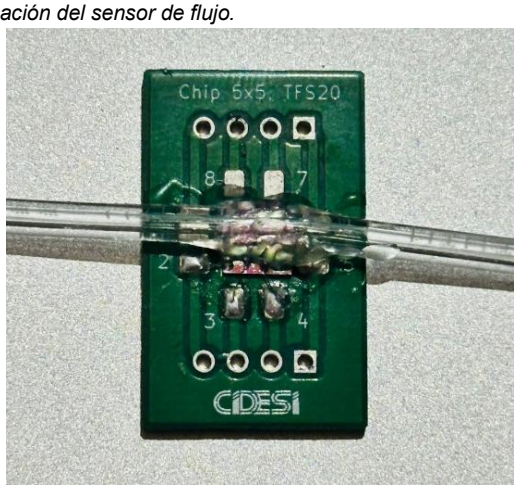
Material	*Temperatura de fusión*	*Características*	*Resultado experimental*
Loctite LF318	217 °C	Aleación SAC305; libre de halógenos; alta estabilidad	No utilizada
BAKU BK-5051	183 °C	Aleación Sn_{63}/Pb_{37}; partículas de 25~45 µm	No satisfactorio
Soldadura IPC J-STD-006	183 °C	Estándar IPC J-STD-006; aplicación manual	No satisfactorio
Mechanic XGSP50	183 °C	Tamaño de partícula de 3 µm; alta viscosidad	Exitoso

Finalmente, después de asegurar la conductividad eléctrica entre las terminales del dispositivo, se procedió con la etapa de aislamiento mediante un proceso de encapsulado. Los principios del empaquetado en microsistemas establecen que el encapsulado no solo aporta soporte mecánico, sino que actúa como una barrera que protege a los dispositivos de agentes externos que comprometen la fiabilidad de este, como lo es la humedad (Tummala, 2001). Debido a su operación, el sensor está en contacto con agua constantemente, por lo que es de vital importancia garantizar un sellado hermético que no comprometa su capacidad de funcionamiento.

Con este fin, se utilizó una resina ultravioleta (UV) de tipo rígido de la marca Resin-T. Se trata de un producto de naturaleza genérica, por lo que su selección se basó en el análisis de propiedades estándar para resinas de polimerización acrílica. Este material presenta una viscosidad de 150-300 cps y una dureza final de 80 Shore D, garantizando durabilidad mecánica contra la erosión del flujo (Resin-T, 2024).

El proceso consistió en colocar una fina capa de resina sobre los pads de níquel con el objetivo de aislar la zona en caso de posibles fugas de agua, posteriormente se crearon dos paredes horizontales en la parte superior e inferior de los elementos resistivos para posicionar una manguera de precisión para microfluídica de la marca Ismatec (IDEX Health & Science) con formulación Tygon LMT-55. El material se seleccionó debido a su estructura interna, contar con paredes lisas reduce las perturbaciones mecánicas y favorece un flujo laminar estable (IDEX Health & Science, 2024). Las dimensiones del conducto corresponden a un diámetro interno de 1.02 mm y un espesor de pared de 0.85 mm, a esta se le realizó una incisión preliminar de 5 mm x 2 mm. Posteriormente se añadió resina en pequeños bloques para cuidar que esta no fluyera al interior del chip, ocasionando contaminación en los elementos sensores. Para comprobar el aislamiento, con el uso de una jeringa se inyectó un flujo de agua que delató las irregularidades en el recubrimiento. Como se puede apreciar en la Figura 7, el encapsulado cubre toda la parte activa del chip, lo cual es crítico para evitar fugas de corriente y mantener la integridad del dispositivo.

Figura 7
Caracterización del sensor de flujo.



2.4. Acondicionamiento de señal y adquisición de datos

De acuerdo con las especificaciones de Infineon Technologies (2023), el dispositivo PSoC 5LP (Programmable System-on-Chip) integra bloques analógicos con la capacidad de procesar datos con una alta precisión y lógica digital programable, características ideales para trabajar con sistemas de adquisición de datos compactos, precisos y estables.

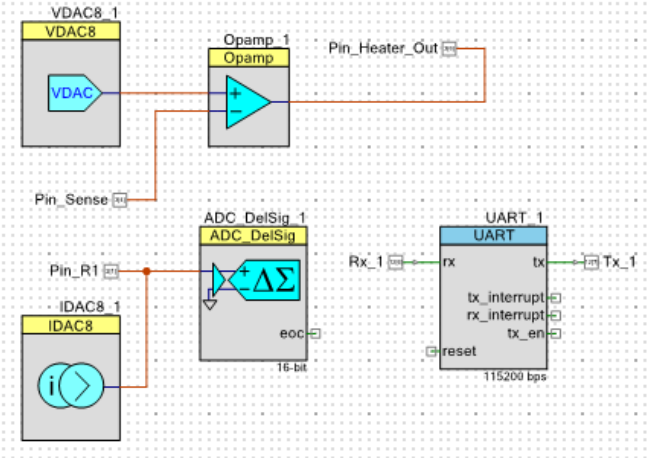
El sistema está diseñado para detectar variaciones de resistencia en los RTD. La arquitectura del dispositivo permite realizar mediciones en diferentes configuraciones; sin embargo, en este

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID038

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

estudio se validó la detección básica de Tiempo de Vuelo utilizando un único receptor funcional, identificado como R1.
Para instrumentar el dispositivo, la estructura del sistema de adquisición de datos se divide en tres subsistemas de operación, los cuales se gestionan a través de los microcomponentes del dispositivo, como se observa en el esquema de la Figura 8:

Figura 8
Diagrama de conexión de bloques analógicos y digitales para el control y monitoreo del sensor ToF en el entorno PSoC Creator.



A. Excitación térmica

Para activar la resistencia calefactora, se empleó un convertidor digital-analógico de voltaje con rango de salida de 0 a 4.080 V. La señal fue transferida a un amplificador operacional interno configurado como seguidor de voltaje, con el propósito de aplicar una excitación controlada al calefactor. Durante las pruebas experimentales, la corriente de activación se ajustó a 5 mA, correspondiente a una potencia aproximada de 7.5 mW para una resistencia de 300 Ω.

B. Digitalización y monitoreo de datos

Mediante el uso de una fuente de corriente constante, se suministran 50 µA para alimentar el sensor resistivo, dicha magnitud fue seleccionada para obtener una lectura estable, minimizando el error por sobrecalentamiento. La señal es procesada por un convertidor de 16 bits cuya tasa de muestreo es de 2000 muestras por segundo. Las variaciones sutiles en el voltaje son detectadas debido a la configuración de conversión continua, primordiales para identificar de manera precisa el pulso térmico en el fluido.

C. Detección del tiempo de vuelo

El proceso de detección del frente térmico comienza estableciendo un valor base obtenido mediante el promedio de 10 muestras iniciales. Se establece un intervalo de espera de 25 ms después del pulso de calor para filtrar señales eléctricas inestables, el sistema está configurado para monitorear en tiempo real. El tiempo de vuelo es registrado en cuanto la lectura tiene un valor de 200 µV superior a la línea base. Con la finalidad de asegurar la validez del sistema, el proceso de detección se detiene 8000 ms después de iniciar la entrada de datos ante la ausencia de una señal válida.

2.5. Configuración experimental y protocolo de pruebas

Después de validar el proceso de adquisición de datos y el sistema de control, se estableció un entorno controlado y reproducible con el objetivo de caracterizar la respuesta del microsensor bajo condiciones de flujo variable.
Para la simulación del flujo se integró un sistema compuesto por una bomba de jeringa programable mononivel modelo NE-501 (New Era Pump Systems, Inc.). Dada su estructura de alta precisión electromecánica, es posible eliminar las inestabilidades mecánicas asociadas a la inyección manual, garantizando un flujo continuo (New Era Pump Systems, Inc., 2024). Las especificaciones de operación de este montaje se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3
Configuración de operación del sistema de inyección.

Parámetro	*Valor usado*
Bomba	NE-501 New Era Pump Systems
Jeringa	20 mL
Diámetro interno configurado	19.3 mm
Caudales crecientes	60, 70, 80 y 90 µL/min
Caudal de repetibilidad	70 µL/min
Caudales decrecientes	85, 75 y 65 µL/min
Tiempo de estabilización	1 minuto
Pulso térmico	20 ms
Corriente del calefactor	5 mA
Corriente del RTD	50 µA
Frecuencia de muestreo	2000 muestras/s

Al bloque de sujeción de la bomba se acopló una jeringa de grado médico con capacidad de 20 ml y un diámetro interno estándar de 19.3 mm. El software de la bomba NE-501 utiliza este diámetro como parámetro base para calcular el flujo, la salida de la jeringa se ensambló directamente al extremo de la micromanguera a través de un adaptador. Controlar el caudal mediante este sistema permite conocer analíticamente la velocidad lineal del fluido sobre el chip para correlacionarla con el ToF. En la Figura 9 se presenta el montaje experimental utilizado, donde se puede observar la conexión de la micromanguera con la bomba de jeringa, alineadas horizontalmente para favorecer la estabilidad del flujo.

Figura 9
Integración de la bomba de jeringa NE-501 con la micromanguera acoplada al sensor de flujo.



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID038

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

El procedimiento inició manteniendo un flujo constante durante al menos 1 minuto, con el objetivo de desalojar burbujas de aire presentes en el conducto y favorecer la estabilidad de la lectura. Posteriormente, una vez estabilizado el caudal programado en la bomba, se envió el comando de activación mediante el monitor serial de Arduino, utilizando comunicación UART a una velocidad de 115200 bps. El disparo del pulso térmico de 20 ms activó una digitalización continua a 2000 muestras/s. Aunque el diseño contempla una potencia máxima de 36.3 mW, las pruebas se realizaron con una potencia real aproximada de 7.5 mW, con el fin de salvaguardar la integridad física del sensor. Este proceso permitió detectar el instante en que la señal del RTD R1 superó el umbral dinámico de 200 µV respecto a la línea base. Este valor se determinó a partir de un criterio de diseño que situara el valor por encima de la resolución teórica de medición del ADC de 16 bits del PSoC 5, además de alejarse significativamente de las derivas térmicas observadas en las pruebas base durante la fase de estabilización del flujo; con ello se asegura un disparo robusto ante la detección del impulso térmico sin el riesgo de activaciones falsas por factores externos. Debido al enfoque de validación de este estudio, la magnitud del umbral se fijó de manera analítica como recurso de seguridad ante la aparición de ruido eléctrico en el sistema, por lo que no se realizaron comparaciones experimentales con otros valores de umbral. La evaluación y optimización de este parámetro se contempla como parte del trabajo futuro.
Finalmente, el tiempo de vuelo (ToF) calculado y los voltajes pico se almacenaron mediante la interfaz serial de Arduino.

2.6. Integración con plataforma hidrométrica

Se contempla la integración del microsensor ToF a la plataforma hidrométrica KFORO con el objetivo de crear un dispositivo capaz de monitorear en tiempo real el caudal en canales de riego a cielo abierto. Cabe destacar que el principio de operación del sensor cuantifica la velocidad local del flujo en contacto directo con la superficie activa del chip. Al entrar en contacto el dispositivo con el canal, la velocidad del fluido (v_{canal}) y las interacciones de presión sobre el área activa del sensor se modelan mediante la ecuación de Bernoulli (6) para flujo hidrodinámico unidimensional (White, 2019).

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g z_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g z_2 \tag{6}$$

Se considera una línea de corriente que va desde el flujo libre del canal (P_1) hasta la zona de contacto con la superficie del microsensor (P_2), la diferencia de altura se asume como despreciable debido al posicionamiento del dispositivo ($Z_1 \approx Z_2$), la velocidad del flujo que mueve el frente térmico se relaciona directamente con la energía cinética del canal (Chow, 2004).
El principio de Tiempo de Vuelo (ToF) mide la velocidad del flujo a partir de una distancia L conocida entre el calefactor y el RTD receptor (Huang, 2022). El sensor proporcionará una estimación local de velocidad. Para estimar el caudal del canal será necesario correlacionar dicha velocidad local con la velocidad media de la sección hidráulica mediante calibración experimental en canal abierto. El caudal macroscópico del canal de riego se calcula a través de la detección de la velocidad media y el área de la sección transversal del mismo mediante (7) la ecuación de continuidad para canales abiertos (Mott & Untener, 2015).

$$Q_{canal} = v * A = \left(\frac{L}{\Delta t}\right) * b * y \tag{7}$$

Donde b representa la base de la sección transversal del canal y y corresponde al nivel de agua medido en tiempo real por KFORO.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y analizan los resultados experimentales obtenidos durante las pruebas físicas del microsensor de flujo. Los datos se dividen en tres fases esenciales: análisis dinámico entre caudales variables, evaluación de repetibilidad bajo flujo controlado y análisis final de posibles efectos de memoria térmica del sistema.

A. Análisis dinámico y curva de calibración

Para evaluar la respuesta dinámica del sistema en un entorno de variaciones controladas, se aplicaron caudales crecientes en un rango de 60 a 90 µL/min. Para cada flujo el sistema tuvo un valor fijo de inyección de corriente en cada componente, siendo 5 mA para el calentador en un pulso de 20 ms y 50 µA para el sensor resistivo.
La Tabla 4 muestra los tiempos de vuelo promedio registrados para cada flujo, se observa una disminución inversamente proporcional en el tiempo de respuesta conforme el valor del flujo se mantuvo en aumento. En (8) se relaciona el inverso del caudal (1/Q) inyectado con el del tiempo de vuelo medido, mediante una regresión lineal por el método de mínimos cuadrados.

$$y = 8043.3x - 62.118 \tag{8}$$

Donde y representa el tiempo de vuelo obtenido en ms y x corresponde al inverso del caudal teórico expresado en min/µL. El coeficiente de determinación obtenido fue de $R^2 = 0.9556$, los resultados muestran una correlación adecuada dentro del intervalo evaluado, aunque la repetibilidad aún se ve afectada por perturbaciones hidráulicas y burbujas en el conducto, tal como se muestra en la Figura 10.

Tabla 4
Resultados de la prueba de caracterización de sensor ToF para la medición de caudal

Caudal (µL/min)	*ToF medido (ms)*	*Promedio ToF (ms)*	*D. E. (σ)*	*C. V. (%)*	*EMA*
	62				
	70				
60	62	71.00	10.34	14.56	7.60
	74				
	87				
	25				
	69				
70	69	56.80	22.90	40.32	19.04
	80				
	41				
	40				
80	27	33.00	5.79	17.55	4.40
	35				

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID038

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

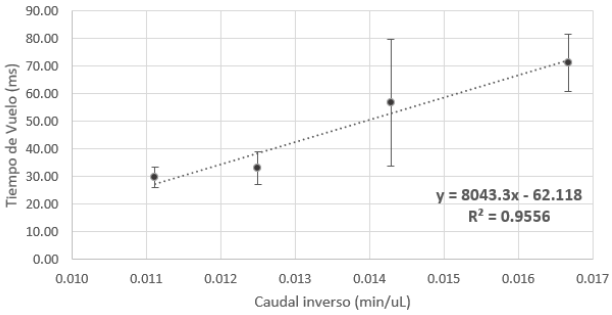
	27				
	36				
	28				
	27				
90	36	29.60	3.65	12.33	2.56
	29				
	28				

Nota: D. E. corresponde a la desviación estándar muestral expresada en ms; C. V. corresponde al coeficiente de variación expresado en porcentaje; y EMA corresponde al error medio absoluto de las mediciones respecto al promedio del grupo, expresado en ms.

Aunque la tendencia es clara, existe una variabilidad en el caudal de 70 µL/min, esto se atribuye a perturbaciones hidráulicas y presencia de burbujas en el conducto.

Figura 10

Curva de calibración del microsensor ToF: relación entre el caudal aplicado y el tiempo de vuelo térmico detectado. Las barras de error representan la desviación estándar muestral (n = 5).



Con el fin de demostrar formalmente la validez de los datos obtenidos por el sensor de tiempo de vuelo, se corroboraron los caudales obtenidos en comparación a los de referencia teórica inyectados por la bomba, mediante (8) se obtiene (9) para calcular el caudal.

$$Q_{calculado} = \frac{8043.3}{ToF_{medido} + 62.118} \tag{9}$$

El error absoluto y los tiempos de vuelo promedio registrados en esta prueba se concentran en la Tabla 5.

Tabla 5

Evaluación del error absoluto en la medición del caudal con el microsensor de tiempo de vuelo.

Caudal teórico (µL/min)	*ToF promedio (ms)*	*Caudal práctico calculado (µL/min)*	*Error absoluto*
60	71.00	60.42	+0.42
70	56.80	67.64	-2.36
80	33.00	84.56	+4.56
90	29.60	87.70	-2.30

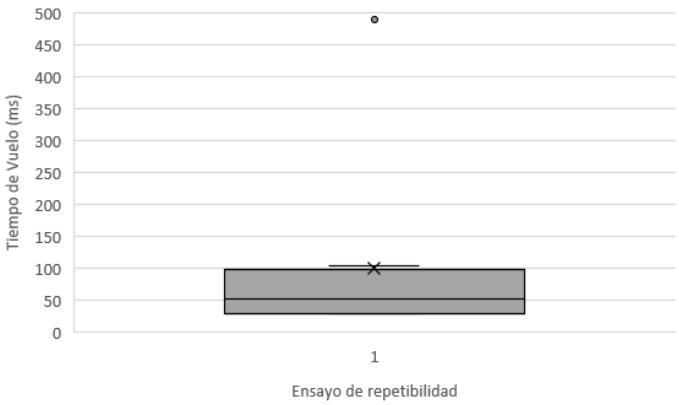
El error absoluto máximo observado en la prueba de flujo creciente fue de 4.56 µL/min. Este resultado indica que la etapa de adquisición de datos permite estimar el caudal con una correspondencia adecuada respecto a los valores programados en la bomba de jeringa, dentro del intervalo experimental evaluado.

Posteriormente, se ejecutó un ensayo de repetibilidad empleando un caudal constante de 70 µL/min para obtener 10 muestras consecutivas del frente térmico; sin embargo, se registraron lecturas anormales que alcanzaron valores críticos de hasta 489 ms. Estas inestabilidades del sistema se atribuyen directamente a perturbaciones derivadas de la bomba de inyección y a filtraciones de burbujas de aire en el conducto.

Como alternativa para reducir el efecto de las lecturas atípicas, se aplicó un filtrado estadístico de datos basado en el criterio analítico del Rango Intercuartílico (RIC), este identifica formalmente como valores atípicos aquellos que exceden el límite superior de la distribución ($Q_3 + 1.5 * RIC$), de acuerdo con el método de detección de datos anómalos donde Q_3 representa el tercer cuartil de los datos ordenados de menor a mayor (Tukey, 1977). A partir de este criterio, de las 10 muestras recolectadas, la medición de 489 ms fue la única que excedió el umbral establecido, por lo que las 9 muestras restantes se mantuvieron para el análisis estadístico. Después de este procesamiento, el tiempo de vuelo promedio se consolidó en 51.13 ms, valor que permitió estimar un caudal práctico de 71.03 µL/min, es decir, 1.03 µL/min por encima del caudal programado. La dispersión de las mediciones, así como la identificación del comportamiento atípico, se muestran mediante el diagrama de cajas y bigotes de la Figura 11.

Figura 11

Diagrama boxplot para la prueba de repetibilidad a 70 µL/min.



Con el fin de validar la confiabilidad del sistema de medición y garantizar su reproducibilidad, se realizó una estimación de la incertidumbre metrológica en base a la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM; JCGM, 2008). Mediante las contribuciones de Tipo A y Tipo B se calculó la incertidumbre combinada (u_C) del Tiempo de Vuelo.

La incertidumbre de Tipo A (u_A) se determinó a partir de la variabilidad estadística de la respuesta en un ambiente de repetibilidad a un caudal de 70 µL/min). Haciendo uso de la desviación estándar de las 9 mediciones válidas después del filtrado ($\sigma = 30.78\ ms$), se obtuvo un valor de $u_A = 10.26\ ms$.

Para la evaluación de Tipo B (u_B) se consideró la resolución instrumental del sistema de adquisición de datos. El convertidor analógico-digital del PSoC 5LP opera a una frecuencia de 2000 muestras/s, la resolución temporal del sistema es de 0.5 ms. Al considerar la probabilidad rectangular que caracteriza a los equipos digitales, se determinó una incertidumbre instrumental de $u_B = 0.144$ ms.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID038

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La incertidumbre combinada del sistema tomó un valor de $u_C = 10.26\,ms$. Asumiendo un nivel de confianza del 95%, se determina el factor de cobertura k = 2, de este modo la incertidumbre expandida (U) de la medición del Tiempo de Vuelo se estableció en $\pm 20.52\,ms$. El análisis demuestra que la mayor contribución de la incertidumbre del sistema proviene de las perturbaciones físicas del fluido (Tipo A) y no de la parte de acondicionamiento de la señal (Tipo B), lo que valida la precisión de la tarjeta PSoC 5LP para esta aplicación.

Finalmente, se llevó a cabo una tercera prueba para evaluar el comportamiento del dispositivo ante una disminución progresiva del caudal, después de haber sido sometido a las pruebas de flujo creciente y repetibilidad. Los resultados resumidos en la Tabla 6 permiten observar la respuesta del sistema bajo condiciones de flujo descendente y analizar posibles efectos de memoria térmica asociados al calentamiento acumulado del sustrato y de las pistas metálicas.

Tabla 6

Evaluación del error absoluto en la medición del caudal decreciente.

Caudal teórico (µL/min)	*ToF promedio (ms)*	*Caudal práctico calculado (µL/min)*	*Error absoluto*
85	38.20	80.18	-4.82
75	40.17	78.64	+3.64
65	41.67	77.50	+12.50

Al disminuir el caudal a 65 µL/min, se observó un incremento notable en el error absoluto, alcanzando un valor de 12.50 µL/min por encima del flujo programado. Debido a la cantidad limitada de datos experimentales, este comportamiento no se define formalmente como histéresis, sino como un indicio de memoria térmica del sustrato de silicio y de las pistas metálicas del dispositivo. Este fenómeno podría estar asociado al calentamiento acumulado durante las pruebas de flujo creciente y a la limitada remoción de calor en condiciones de bajo caudal.

IV. CONCLUSIONES

Se diseñó, ensambló y validó de manera preliminar un microsensor térmico de flujo basado en el principio de Tiempo de Vuelo (ToF), fabricado mediante la tecnología de película delgada TFS20 del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). El diseño geométrico del chip demostró compatibilidad con las reglas de manufactura del proceso, permitiendo la integración de un calefactor resistivo y elementos RTD para la detección del frente térmico.

La caracterización experimental se realizó en un banco de pruebas bajo condiciones controladas de microflujo, utilizando una bomba de jeringa programable y una micromanguera acoplada al sensor. En el intervalo de 60 a 90 µL/min, los resultados mostraron una correlación adecuada entre el tiempo de vuelo medido y el inverso del caudal aplicado, con un coeficiente de determinación cercano a 0.95. El error absoluto máximo observado en la prueba de flujo creciente fue de 4.56 µL/min, lo que indica una respuesta funcional del sistema de adquisición y detección dentro del intervalo evaluado.

Desde la perspectiva de ensamble en un laboratorio institucional, se observó que el uso de soldadura en pasta de alta viscosidad y tamaño de partícula micrométrico, sin la adición externa de flux, favoreció la conexión eléctrica entre los pads del chip y los conductores externos. No obstante, el proceso de encapsulado con resina UV rígida evidenció la vulnerabilidad mecánica del dispositivo, afectando la lectura diferencial originalmente prevista con dos RTD. Por esta razón, la validación reportada en este trabajo se realizó empleando únicamente el receptor funcional R1.

Las pruebas con flujo descendente mostraron un incremento del error a bajos caudales, particularmente a 65 µL/min. Debido a la cantidad limitada de datos experimentales, este comportamiento no se define formalmente como histéresis, sino como un indicio de memoria térmica asociado al calentamiento acumulado del sustrato de silicio y de las pistas metálicas. Estos resultados permiten identificar áreas de mejora relacionadas con la gestión térmica, el encapsulado y la estabilidad hidráulica del montaje experimental.

Como trabajo futuro, se contempla optimizar el encapsulado del microsensor, recuperar la operación diferencial con dos RTD y ampliar la caracterización experimental en un mayor intervalo de caudales. Asimismo, se plantea su integración progresiva con la plataforma hidrométrica KFORO para evaluar su desempeño en escenarios reales de canales de riego a cielo abierto, previa calibración entre la velocidad local medida por el chip y la velocidad media de la sección hidráulica.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Met-Mex Peñoles, al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) el apoyo brindado durante el desarrollo de la presente investigación.

VI. REFERENCIAS

Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O. (2013). *Fundamentos de circuitos eléctricos* (5.ª ed.). McGraw-Hill.

Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones* (4.ª ed.). McGraw-Hill.

Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw-Hill.

CIDESI. (14 de mayo de 2025). *Proceso CIDESI TFS20*.

Henkel Adhesive Technologies. (2023). *Technical Data Sheet: LOCTITE LF 318*.

Huang, C. H. (2022). Micromachined Thermal Time-of-Flight Flow Sensors and Their Applications. *Micromachines*, 13(10), 1729. https://doi.org/10.3390/mi13101729

IDEX Health & Science. (2024). *Ismatec Tygon LMT-55 Peristaltic Tubing Technical Specifications*. IDEX Corporation.

Infineon Technologies. (2023). *PSoC 5LP: Programmable System-on-Chip (PSoC) Family Datasheet*.

IPC. (2008a). *IPC J-STD-006B: Requirements for Electronic Grade Solder Alloys and Fluxed and Non-Fluxed Solid Solders for Electronic Soldering Applications*. Association Connecting Electronics Industries.

IPC. (2008b). *IPC J-STD-004B: Requirements for Soldering Fluxes*. Association Connecting Electronics Industries.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

JCGM. (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* (JCGM 100:2008). Joint Committee for Guides in Metrology.

Kuo, J. T. W., Yu, L., & Meng, E. (2012). *Micromachined Thermal Flow Sensors—A Review*. Micromachines, 3(3), 550-573. https://doi.org/10.3390/mi3030550

Lintel, H. V., et al. (2011). *Time-of-flight thermal flowrate sensor for lab-on-chip applications*. Lab on a Chip, 11(2), 215-224. https://doi.org/10.1039/c0lc00229a

Mechanic Precision Tools. (2024). *Technical Data Sheet: XGSP50 Series High-Precision Solder Paste (Sn63/Pb37)*. HK Mechanic Precision Tools Co., Ltd.

Mott, R. L., & Untener, J. A. (2015). *Mecánica de Fluidos* (7a ed.). Pearson Educación.

New Era Pump Systems, Inc. (2024). *Model NE-500 OEM Ambidextrous Syringe Pump Series User Manual*. New Era Pump Systems.

Ofiteck. (s.f.). *Ficha técnica: Soldadura de Estaño en Pasta BAKU BK-5051*. https://ofiteck.com/products/soldadura-estano-baku-5051-50gr

Panhans, C., Koch, T., Kuehne, I., Leonhard, S., Hilliges, R., Stolle, R., & Frey, A. (s. f.). *Modelado de un sensor de tiempo de vuelo térmico para flujo de canal abierto de baja velocidad.*

Relife. (s.f.). *Product Manual: RL-403 183°C Solder Paste for SMD Repair*.

Resin-T. (2024). *Technical Data Sheet: UV-Curable Hard Resin for Electronic Components (TDS No. RT-H2024)*. HK Resin-T Chemicals.

Rodrigues, R. J., & Furlan, R. (2009). *Time-of-Flight Flow Microsensor using Free-Standing Microfilaments. Journal of Integrated Circuits and Systems, 4*(2), 84-88. https://doi.org/10.29292/jics.v4i2.303

Sánchez, R., & Chávez, I. (2025). *Especificación técnica del proceso CIDESI_TFS20*.

Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley.

Tummala, R. R. (2001). *Fundamentals of Microsystems Packaging*. McGraw-Hill Education.

White, F. M. (2019). *Mecánica de Fluidos* (8a ed.). McGraw-Hill.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización [Conceptualization]	Hesner Coto Fuentes, Karla Victoria Guevara Amatón
2	Curación de datos [Data curation]	Itzel Sarahim González Aroña
3	Análisis formal [Formal analysis]	Hesner Coto Fuentes, Itzel Sarahim González Aroña
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	*Hesner Coto Fuentes, Karla Victoria Guevara Amatón*
5	Investigación [Investigation]	Itzel Sarahim González Aroña
6	Methodología [Methodology]	Itzel Sarahim González Aroña
7	Administración del proyecto [Project administration]	Hesner Coto Fuentes
8	Recursos [Resources]	Hesner Coto Fuentes, Karla Victoria Guevara Amatón
9	Software [Software]	Itzel Sarahim González Aroña
10	Supervision [Supervision]	Hesner Coto Fuentes, Karla Victoria Guevara Amatón
11	Validación [Validation]	Itzel Sarahim González Aroña
12	Visualización [Visualization]	Itzel Sarahim González Aroña
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Hesner Coto Fuentes, Itzel Sarahim González Aroña
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Hesner Coto Fuentes, Itzel Sarahim González Aroña

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID038

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Evaluación de la Percepción del Uso de Realidad Aumentada como Método Odontológico

Evaluation of Students´Perception of Augmented Reality as a Dental Teaching Tool

Palomares-Ibarra, K.A.[1]; Reyna-Jiménez, M.G.[2]✉; Navarro-Villalobos, M.[3]; Favela-Flores, S.[4]; Delgadillo-Delgadillo, Z[5].

Datos de Adscripción:

[1] Palomares Ibarra, Karen Adriana
Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Odontología, Unidad Laguna, Torreón, Coahuila. México.
kpalomares@uadec.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4047-3408

[2] ✉Reyna Jiménez, María Guadalupe
Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Odontología, Unidad Laguna, Torreón, Coahuila. México.
Reyna_m@uadec.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8543-1034

[3] Navarro Villalobos, Mauricio
Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Odontología, Unidad Laguna, Torreón, Coahuila. México.
mauricio.navarro.villalobos@uadec.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1409-5560

[4] Favela Flores, Sergio
Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Odontología, Unidad Laguna, Torreón, Coahuila. México.
sefavelaf@uadec.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6133-8636

[5] Delgadillo Delgadillo, Zoila
Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Odontología, Unidad Laguna, Torreón, Coahuila. México.
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0282-6467

***Resumen* – La educación odontológica, basada en clases magistrales, modelos físicos y prácticas, ha demostrado ser efectiva, pero también presenta limitaciones. La Realidad Aumentada (RA) permite visualizar contenidos complejos y la comprensión de conceptos importantes, es por ello que puede ser implementada como una tecnología educativa. Se realizó un estudio cuantitativo y descriptivo, con 50 alumnos de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna, quienes interactuaron con la aplicación ARLOOPA y posteriormente completaron una encuesta estructurada con una escala tipo Likert. Los datos fueron analizados mediante estadística descriptiva, utilizando frecuencias y porcentajes para determinar el grado de acuerdo o desacuerdo de los participantes. Los resultados obtenidos indicaron una percepción ampliamente positiva y un alto grado de aceptación de la Realidad Aumentada; la percepción estudiantil determinó que es una estrategia innovadora, motivadora y efectiva dentro del aprendizaje. Sin embargo, identifican la necesidad de una mayor frecuencia de su uso, capacitación específica y mejor infraestructura tecnológica para garantizar su implementación continua y eficiente en el concepto educativo.**

Palabras Clave: Aprendizaje, Educación Odontológica, Percepción Estudiantil, Realidad Aumentada, Tecnología Educativa

***Abstract* – Dental education, based on lectures, physical models, and practical training, has proven to be effective; however, it also presents certain limitations. Augmented Reality (AR) enables the visualization of complex content and facilitates the understanding of important concepts, making it a valuable educational technology . A quantitative, descriptive study was conducted with 50 postgraduate students from the Faculty of Dentistry, Unidad Laguna. Participants interacted with the ARLOOPA application and subsequently completed a structured questionnaire using a Likert-type scale. The data were analyzed using descriptive statistics, specifically frequencies and percentages, to determine the participants' level of agreement or disagreement. The findings revealed a highly positive perception and a high level of acceptance of Augmented Reality. Students perceived AR as an innovative, motivating, and effective strategy for enhancing the learning process. Nevertheless, they also identified the need for more frequent implementation, targeted training, and improved technological infrastructure to ensure its continuous and effective integration into the educational enviroment.**

Keywords: Augmented Reality, Dental Education, Educational Technology, Learning, Student Perception.

I. INTRODUCCIÓN

La enseñanza tradicional en odontología, basada en clases magistrales, modelos físicos y prácticas en fantomas, ha demostrado ser efectiva, pero también presenta limitaciones. La falta de recursos, la dificultad para visualizar estructuras complejas, y la distancia entre el conocimiento teórico y su aplicación clínica inmediata representan desafíos importantes.

Ante estas limitaciones, ha surgido la necesidad de implementar estrategias digitales que contribuyan a mejorar los procesos de enseñanza-aprendizaje en el ámbito de las ciencias de la salud (Martínez Pérez et al., 2021; Zaragoza Pérez & Cuevas Escudero, 2020).

La Realidad Aumentada se posiciona como una estrategia complementaria al combinar información virtual en el entorno físico en tiempo real, lo que favorece experiencias de aprendizaje más interactivas, contextualizadas y significativas (De Pedro Carracedo, 2011). La literatura científica señala que esta tecnología promueve una mayor motivación del estudiante durante el aprendizaje (Richter et al., 2022).

Diversos estudios recientes coinciden en que la Realidad

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID044

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Aumentada mejora la comprensión de conceptos complejos y contribuye al desarrollo de la visualización espacial de estructuras anatómicas y procedimientos clínicos (Flores-Lucero & González Llanos, 2022; Avila-Garzon et al., 2021).
Con el propósito de valorar el potencial de la Realidad Aumentada en la enseñanza odontológica, este estudio analizó la percepción de 50 estudiantes de primer y segundo año de posgrado de la Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Laguna, después de utilizar esta herramienta.
Aunque la Realidad Aumentada representa una herramienta con amplio potencial educativo, su incorporación implica retos vinculados con la infraestructura tecnológica, la capacitación del docente y la accesibilidad a los recursos digitales (Cárdenas Ruiz et al., 2018; Urresta-Yépez, 2024). Por ello, este estudio tiene como propósito promover una educación más innovadora, eficiente y adaptada a los nuevos entornos digitales.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Este estudio descriptivo, cualitativo y cuantitativo, analiza la percepción posterior al uso de la Realidad Aumentada a través de una aplicación disponible en dispositivos móviles de alumnos del posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna en Torreón, Coahuila, México.
La población propuesta para esta investigación corresponde a 50 alumnos de la Facultad de Odontología Unidad Laguna, que estén cursando primer y segundo año de la maestría en Endodoncia, Periodoncia, Odontopediatría y Ortodoncia, durante el ciclo escolar 2025. Debido a la dinámica de aplicación del instrumento, en el cual coincidieron estudiantes de diferentes áreas en un mismo espacio, no se realizó la identificación individual de la especialidad de cada participante. Debido a ello, el análisis de resultados se efectuó de manera conjunta.
Como material didáctico se utilizó la aplicación “ARLOOPA” de Realidad Aumentada, la cual es compatible con los sistemas iOS y Android; y se puede instalar fácilmente en los teléfonos móviles de los estudiantes.
ARLOOPA es una aplicación de realidad aumentada que permite visualizar modelos tridimensionales e interactivos mediante un dispositivo móvil. Su funcionamiento se basa en la integración de elementos digitales con el entorno físico, permitiendo que el usuario observe los modelos virtuales a través de la cámara del dispositivo móvil, teléfono o tableta.
En el caso de la actividad desarrollada, se utilizó la aplicación ARLOOPA para la visualización de modelos relacionados con las ciencias de la salud, permitiendo observar estructuras anatómicas de manera tridimensional. Para utilizarla, se debe generar su registro, para ingresar y seleccionar el recurso de interés dentro de la biblioteca disponible. Posteriormente, se activa la cámara del dispositivo y se realiza un escaneo del entorno, identificando una superficie adecuada para colocar el modelo virtual. Una vez reconocida la superficie, el recurso se proyecta sobre ella y puede observarse desde diferentes ángulos, facilitando la exploración de sus características.
Como se observa en la Figura 7, mediante el dispositivo móvil es posible visualizar el contenido digital integrado al espacio físico, favoreciendo una experiencia de aprendizaje más interactiva y visual.
Además, la posibilidad de manipular, acercar, alejar y observar los modelos desde diferentes perspectivas puede facilitar la comprensión de estructuras que, mediante imágenes bidimensionales tradicionales, podrían resultar más difíciles de interpretar.
Como parte complementaria del estudio, los estudiantes fueron evaluados a través de la aplicación de una encuesta de tipo Likert orientada a valorar su experiencia con la aplicación de Realidad Aumentada, y su percepción sobre el uso de esta tecnología como herramienta de apoyo en la enseñanza.

2.1 Primera Etapa

Se les brindó a los 50 alumnos una introducción sobre el concepto de Realidad Aumentada y cómo funciona a través de una presentación en PowerPoint.

2.2 Segunda Etapa

Los alumnos instalaron en su dispositivo móvil la aplicación ARLOOPA, y a través de la cámara de este, lograron visualizar imágenes de Realidad Aumentada en tercera dimensión.

2.3 Tercera Etapa

Como instrumento de recolección de datos, se empleó una encuesta tipo Likert para evaluar la experiencia y la percepción de los estudiantes respecto al uso de la Realidad Aumentada. Las escalas para medir el grado de acuerdo con cada afirmación (1= Totalmente en desacuerdo | 2= En desacuerdo | 3= Ni de acuerdo ni en desacuerdo | 4= De acuerdo | 5= Totalmente de acuerdo).

1. Comprendí con claridad qué es la realidad aumentada.
2. Me pareció interesante la forma en que se puede aplicar la RA en la educación.
3. La demostración me ayudó a visualizar el potencial de la RA como herramienta de apoyo.
4. La experiencia con RA fue novedosa y diferente a otros métodos.
5. Me sentí cómodo(a) utilizando la aplicación de RA.
6. Me sentí más motivado(a) a estudiar/participar en clase gracias a esta tecnología.
7. Considero que esta tecnología tiene potencial para mejorar el aprendizaje en la carrera.
8. La aplicación de realidad aumentada Arloopa fue fácil de usar.
9. Puede acceder sin problemas al contenido desde mi dispositivo.
10. Prefiero aprender con realidad aumentada que con textos o imágenes planas.
11. Considero que la realidad aumentada debe implementarse de forma permanente en la enseñanza odontológica.
12. Recomendaría el uso de realidad aumentada a otros estudiantes.
13. Conocía el concepto de realidad aumentada.
14. Me gustaría recibir formación o talleres sobre el uso de la realidad aumentada en odontología.
15. Estoy abierto(a) a probar más herramientas tecnológicas en mi formación personal.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID044

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

16. Pregunta abierta
¿Qué aspectos mejorarías en el uso de realidad aumentada en clases?

2.4 Cuarta Etapa

Los datos recopilados mediante las encuestas fueron analizados utilizando estadística descriptiva para evaluar la satisfacción percibida por los estudiantes.

A. Figuras

Figura 1
Creación de cuenta en aplicación. Se registra en la aplicación ARLOOPA desde un dispositivo móvil con correo electrónico y contraseña.



Figura 2
Código de verificación. Confirmar código de verificación enviado al correo electrónico.



Figura 3
Sección modelos. Seleccionar sección de modelos.



Figura 4
Sección educación. Seleccionar sección education.



Figura 5
Sección anatomy. Seleccionar sección anatomy.

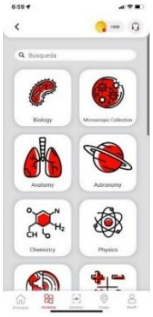
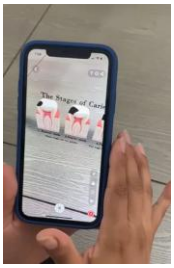


Figura 6
Modelo de caries. Dar click en modelo the stages of caries development 3D model.



Figura 7
Interacción con la imagen en 3D. Escanear entorno para posicionar la imagen e interactuar con la imagen moviendo el celular o a través de los dedos en la pantalla.



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados de la encuesta aplicada a 50 estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna, cuyo propósito fue analizar la percepción y la experiencia de los participantes respecto al uso de la Realidad Aumentada (RA) como recurso complementario para el aprendizaje.

Como se observa en la figura 8, el 84% de los estudiantes, se mostró totalmente de acuerdo con haber comprendido qué es la Realidad Aumentada, mientras que un 14% estuvo de acuerdo. Solo 1 alumno expresó desacuerdo. Este resultado es relevante debido a que el conocimiento previo constituye un elemento importante para la incorporación de una herramienta tecnológica al proceso educativo. En este estudio, la actividad introductoria permitió que la mayoría de los alumnos identificaran las

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID044

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

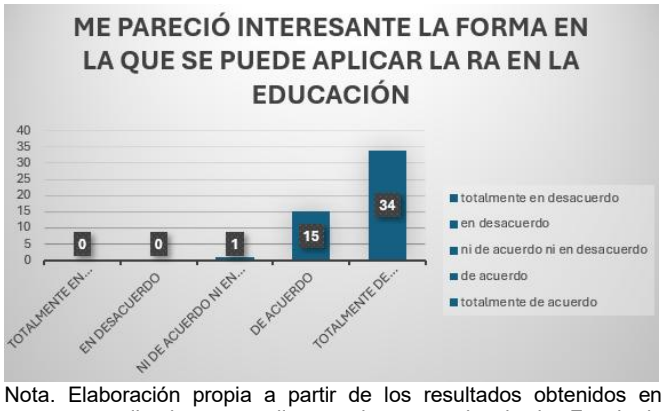
características básicas de la RA antes de interactuar con la aplicación, reduciendo así las dificultades que se presentan cuando desconocemos una nueva tecnología.

Figura 8
Comprensión del concepto de Realidad Aumentada



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna durante 2025

Figura 9
Interés en la aplicación de Realidad Aumentada en la educación



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna durante 2025

En la figura 9, se determinó que el 68% de los alumnos encuestados consideró totalmente interesante la forma en la que se puede aplicar la Realidad Aumentada en la educación y un 30% estuvo de acuerdo, lo que indica una disposición positiva hacia la integración tecnológica en el aprendizaje. Solo una persona (2%) se expresó indiferente, y ninguna expresó desacuerdo.
Más allá de una respuesta positiva, este resultado se interpreta como un indicador de apertura hacia el uso de recursos tecnológicos dentro de la formación odontológica.
Esta percepción guarda relación con el planteamiento de De Pedro Carracedo (2011), citado en el marco teórico del estudio, respecto a la posibilidad de utilizar la Realidad Aumentada para generar experiencias de aprendizaje más interactivas, contextualizadas y significativas.

Figura 10
Percepción del potencial educativo de la Realidad Aumentada



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna durante 2025

La figura 10 muestra que el 72% de los estudiantes afirmó que la demostración les ayudó a visualizar el potencial de la Realidad Aumentada como herramienta de apoyo, un 26% estuvo de acuerdo, mientras que solo una persona (2%) manifestó desacuerdo. Este resultado de respuestas favorables es significativo porque evidencia que, después de una experiencia directa con la tecnología, los estudiantes pudieron identificar posibilidades educativas que quizá no serían tan evidentes a partir de la explicación exclusivamente teórica.
Este resultado concuerda con los antecedentes incluidos en el estudio, Flores-Lucero y González Llanos (2022) y Avila-Garzon (2021) en donde se destaca el potencial de la Realidad Aumentada para apoyar la visualización espacial de estructuras anatómicas y contenidos complejos.

Figura 11
Experiencia y novedad percibida



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna durante 2025

En la figura 11, el 70% de los estudiantes consideró que la experiencia con la Realidad Aumentada fue novedosa y diferente a otros métodos, mientras que el 28% estuvo de acuerdo, y únicamente un 2% mantuvo una postura neutral. La elevada percepción de novedad puede relacionarse con el carácter

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID044

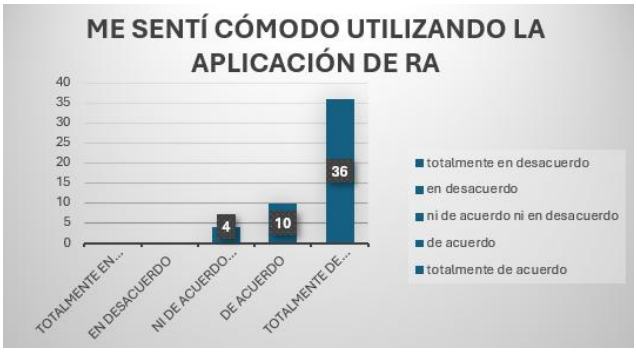
This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

interactivo de la herramienta, particularmente con la posibilidad de manipular y observar modelos tridimensionales mediante un dispositivo móvil.

Este resultado coincide con la concepción de la Realidad Aumentada como recurso complementario planteada por De Pedro Carracedo (2011), donde se describe la evolución y la diversidad de aplicaciones educativas que actualmente cuentan con esta tecnología.

Figura 12

Comodidad en el uso de la aplicación



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna durante 2025

La figura 12 establece que el 72% de los participantes manifestó sentirse cómodo al usar la herramienta tecnológica, un 20% estuvo de acuerdo y solo un pequeño grupo (8%) expresó una postura neutral. Esto indica que, durante la experiencia realizada, la interacción con la aplicación no representó una barrera significativa para la mayoría de los participantes. Este punto es importante porque la percepción de dificultad tecnológica puede condicionar la disposición del estudiante para incorporar una herramienta digital a sus actividades académicas. La necesidad de considerar las características de los usuarios coincide con los desafíos de accesibilidad y capacitación identificados por Cárdenas Ruiz et al. (2018) y Urresta-Yépez (2024).

Figura 13

Motivación al aprender con la Realidad Aumentada.



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna durante 2025

Como se muestra en la figura 13, el 60% de los alumnos indicó sentirse más motivados en su totalidad a estudiar o participar en clase gracias al uso de esta tecnología, un 28% estuvo de acuerdo y un 12% no estuvo ni de acuerdo ni en desacuerdo, lo que refuerza la importancia de la implementación de metodologías activas y visuales en la educación odontológica.

Este hallazgo es consistente con los resultados obtenidos por Richter et al. (2022), quienes identificaron un incremento en la motivación académica por parte de los estudiantes asociado al uso de tecnologías de Realidad Aumentada en contextos educativos. (17)

Figura 14

Potencial educativo de la Realidad Aumentada en odontología



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna durante 2025

En la figura 14, se muestra que el 72% del total de los encuestados consideró que la Realidad Aumentada tiene potencial para mejorar el aprendizaje en la carrera, un 24% concordó casi en su totalidad con ellos y únicamente 2 personas (4%) mostraron su neutralidad; esto destaca la utilidad y el beneficio del uso de la Realidad Aumentada para observar estructuras anatómicas o procedimientos quirúrgicos clínicos con mayor detalle.

De manera similar, Kamińska et al. (2023) concluyen que la Realidad Aumentada constituye una herramienta eficaz para fortalecer el aprendizaje en educación superior debido a su capacidad de integrar información visual y contextual. (8)

Figura 15

Facilidad de uso y accesibilidad



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna durante 2025

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID044

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Como se muestra en la figura 15, nuevamente el 72% de los encuestados afirmó que la aplicación fue fácil de usar, el 24% estuvo de acuerdo, una persona (2%) mantuvo una postura neutral y el otro 2% restante se mostró en desacuerdo. A pesar de que 1 persona mostró en su totalidad desacuerdo. En este caso, la mayoría de los participantes pudo interactuar con ARLOOPA sin identificar su uso como una dificultad importante. Esto puede haber favorecido la aceptación observada en otras dimensiones del instrumento, como comodidad, interés y disposición a continuar utilizando herramientas tecnológicas.
Sin embargo, el hallazgo de participantes que manifiestan neutralidad o desacuerdo muestra que la facilidad de su uso no fue percibida de manera idéntica por todo el grupo, lo cual adquiere importancia cuando se pretende trasladar la experiencia a poblaciones con diferentes niveles de alfabetización digital.

Figura 16
Accesibilidad del contenido desde dispositivos móviles



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna durante 2025

Asimismo, en la figura 16, se determina que el 76% indicó haber accedido sin problemas al contenido desde su dispositivo, un 20% estuvo de acuerdo y un 4% manifestó dificultades para acceder a la aplicación, lo cual recalca que el acceso puede estar condicionado por la conectividad, disponibilidad de internet, características del dispositivo y de recursos tecnológicos del usuario como planes telefónicos privados. Esta observación coincide con los desafíos de accesibilidad e infraestructura señalados por Cárdenas Ruiz et al. (2018) y Urresta Yépez (2024).

En la figura 17, el 66% y el 16% de los estudiantes de posgrado prefirieron aprender con realidad aumentada frente a textos o imágenes planas.
Lo que indica que esta tecnología facilita la comprensión visual y la retención del conocimiento. Solo un 4% mostró desacuerdo, mientras que un 14 % mantuvo una postura neutral.
Los antecedentes incluidos en el estudio señalan precisamente el potencial de la Realidad Aumentada para apoyar la visualización de estructuras complejas y favorecer experiencias interactivas, como los de Flores-Lucero y González Llanos (2022) y Avila-Garzon et al. (2021) en donde plantean posibilidades relacionadas con la visualización espacial y la incorporación de recursos tridimensionales en la educación.

Figura 17
Preferencia de aprendizaje



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna durante 2025

La figura 18 muestra que el 62% y el 30% de los estudiantes estuvieron totalmente de acuerdo y de acuerdo con implementar la Realidad Aumentada de forma permanente en la enseñanza odontológica, mostrando una aceptación casi generalizada. Únicamente un 8% se mostró neutral.
Los resultados obtenidos respaldan lo descrito por Koumpouros (2024), quien señala que la integración sistemática de la Realidad Aumentada puede enriquecer significativamente los procesos formativos en el ámbito educativo. (9)

Figura 18
Implementación futura en la enseñanza odontológica



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna durante 2025

De manera similar, la figura 19, muestra que el 64% del alumnado afirmó que recomendaría el uso de esta tecnología a sus compañeros, así como el 32%, confirmando una experiencia positiva y satisfactoria.

Como se muestra en la figura 20, antes de la actividad, el 42% y 36% de los alumnos ya había escuchado o conocía el concepto de Realidad Aumentada, mientras que un 10% parecía conocer poco al respecto, el otro 10% no conocía sobre su existencia y un único alumno determinó que desconocía por completo el término de Realidad Aumentada.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID044

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La existencia de participantes con menor familiaridad también ayuda a explicar la relevancia de la explicación introductoria realizada antes de la interacción con ARLOOPA.

Figura 19
Porcentaje de recomendación del uso de la Realidad Aumentada



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna durante 2025

Figura 20
Conocimiento previo y disposición al aprendizaje



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna durante 2025

Figura 21
Porcentaje de interés en conocer más sobre la Realidad Aumentada



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna durante 2025

En la figura 21, el 46% de los participantes expresó completamente interés en recibir talleres para adquirir mayor conocimiento sobre el uso de la Realidad Aumentada, otro 46% de los participantes concuerda con ellos, destacando su disposición a seguir aprendiendo; esto a pesar de que 2 personas (4%) no pudieron determinar si les interesaría recibir capacitación y el otro 4% determinó que no le gustaría recibir más información sobre la Realidad Aumentada, determinando que desean atenerse al método de enseñanza tradicional.
Cárdenas Ruiz et al. (2018) y Urresta-Yépez (2024) señalan que la capacitación y las condiciones de infraestructura constituyen aspectos relevantes para la incorporación de tecnologías de Realidad Aumentada en contextos educativos; por tanto, para lograr una incorporación pedagógica adecuada sería conveniente que docentes y estudiantes comprendieran cuándo, cómo y con qué finalidad utilizar la Realidad Aumentada dentro de una actividad académica.

Figura 22
Porcentaje de alumnos abiertos a probar nuevas herramientas tecnológicas en la enseñanza



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad Laguna durante 2025

Finalmente, en la figura 22, se muestra que el 68% de los encuestados se mostró dispuesto a probar más herramientas digitales en su formación, junto con 15 alumnos más (30%) que estuvieron de acuerdo, evidenciando una mentalidad positiva hacia la innovación educativa.
Solo una persona (2%) se mantuvo neutral ante la propuesta.
Este resultado amplía la interpretación de las respuestas anteriores, ya que la disposición favorable no se limita a ARLOOPA o a la Realidad Aumentada, sino que refleja una apertura general hacia la incorporación de nuevas tecnologías educativas.

Resultados cualitativos (pregunta abierta)

Los comentarios abiertos reflejan un interés genuino por continuar explorando la Realidad Aumentada en el sector educativo. Los estudiantes valoran su impacto visual y su potencial didáctico, pero sugieren ampliar su uso, mejorar la accesibilidad y ofrecer capacitación formal para docentes y alumnos.
Los estudiantes la perciben como una estrategia innovadora, motivadora y efectiva para comprender de mejor manera

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID044

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

conceptos complejos. Sin embargo, identifican la necesidad de una mayor frecuencia de su uso, capacitación específica y mejor infraestructura tecnológica para garantizar su implementación continua y eficiente en el contexto educativo. En este sentido, la capacitación del docente y alfabetización digital son elementos clave para obtener una implementación exitosa y equitativa de esta tecnología en el entorno educativo.

Tabla 1
Principales mejoras al uso de Realidad Aumentada

Categoría	Ejemplos de respuestas	Frecuencia aproximada
Mayor implementación	"Usarla más en exposiciones", "aplicarlas más en clases difíciles"	Alta
Capacitación docente y estudiantil	"Capacitación para implementarla en procedimientos clínicos", "llevar un curso para aprovecharla"	Media
Accesibilidad y aspectos técnicos	"Mejorar el acceso sin internet", "ver modelos en diferentes planos o con movimiento"	Media
Ampliación de contenidos	"Más modelos 3D", "temas clínicos o radiografías", "complementar con videos"	Alta

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en la pregunta abierta aplicada a estudiantes de posgrado de la Facultad de Odontología Unidad durante 2025

IV. CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio concluyen que los estudiantes de posgrado en odontología presentan una percepción altamente positiva hacia el uso de la Realidad Aumentada como herramienta complementaria en el proceso de enseñanza. La evidencia cuantitativa y cualitativa demuestra que esta tecnología es valorada como una estrategia innovadora, motivadora y útil para facilitar la comprensión de conceptos complejos, especialmente aquellos relacionados con la visualización tridimensional de estructuras anatómicas y conceptos clínicos.

No obstante, los resultados también ponen de manifiesto ciertas limitaciones que deben considerarse para su adecuada integración en el ámbito educativo. Entre ellas, se identifica que algunas representaciones visuales carecen de detalle anatómico en comparación a los textos, lo que hace necesario complementar el uso de la Realidad Aumentada con materiales teóricos tradicionales para profundizar en las características anatómicas observadas; otra limitante es la capacitación de docentes y estudiantes, así como las condiciones de conectividad; todo esto puede determinar la verdadera utilidad de la herramienta.

Asimismo, se reconoce la importancia de que las aplicaciones de Realidad Aumentada cuenten con sustento científico claramente identificado, que avale la información visual presentada y garantice su validez académica, particularmente en el contexto de la enseñanza odontológica. La ausencia de referencias explícitas o de validación por parte de profesionales del área puede generar dudas sobre la confiabilidad del contenido mostrado.

Por ello, los hallazgos de este estudio respaldan la consideración de la Realidad Aumentada como recurso complementario, pero no como sustituto de los métodos tradicionales ni como una estrategia que deba aplicarse de manera uniforme a todos los contenidos.

En conclusión, la Realidad Aumentada posee un alto potencial como recurso pedagógico complementario en la enseñanza de la odontología; sin embargo, su aprovechamiento óptimo depende de una integración planificada, respaldada científicamente y acompañada de estrategias de formación tecnológica que permitan maximizar sus beneficios y minimizar sus limitaciones. La aportación de los resultados no solo consiste en mostrar que los estudiantes aceptaron la tecnología, sino en evidenciar que su percepción favorable se acompaña de expectativas y condiciones concretas para su utilización educativa. Esto permite plantear que la incorporación de la Realidad Aumentada en odontología debe partir de objetos pedagógicos definidos, contenidos pertinentes, recursos visuales confiables y estrategias de capacitación que permitan tanto a docentes como a estudiantes aprovechar sus posibilidades sin perder de vista sus limitaciones.

V. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los docentes por el apoyo incondicional que brindaron en el transcurso de este proceso, por no quitar el dedo del renglón, por su paciencia y sus palabras de aliento.

Al alumnado de posgrado, por su disposición y apoyo en escuchar mi propuesta y hacer partícipes de este estudio.

A la Facultad de Odontología UAdeC, Unidad Laguna, por ser mi casa 5 años consecutivos, en los cuales pasé muy buenos momentos, con compañeros, amigos y maestros.

VI. REFERENCIAS

Abd Majid, N. A., & Abd Majid, N. (2018). Augmented reality to promote guided discovery learning for STEM learning. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 8(4-2), 1494–1500. https://doi.org/10.18517/ijaseit.8.4-2.6810

ARLOOPA Inc. (2025). ARLOOPA: Augmented and virtual reality app. https://www.arloopa.com

Avila-Garzon, C., Bacca-Acosta, J., Kinshuk, Duarte, J., & Betancourt, J. (2021). Augmented reality in education: An overview of twenty-five years of research. Contemporary Educational Technology, 13(3), Artículo ep302. https://doi.org/10.30935/cedtech/10865

Blázquez Sevilla, A. (2017). Realidad aumentada en educación. Gabinete de Tele-Educación, Universidad Politécnica de Madrid.

Cárdenas Ruiz, H., Mesa Jiménez, F. Y., & Suárez Barón, M. J. (2018). Realidad aumentada (RA): Aplicaciones y desafíos para su uso en el aula de clase. Educación y Ciudad, (35).

De Pedro Carracedo, J. (2011). Realidad aumentada: Un nuevo paradigma en la educación superior. En Actas del Congreso Iberoamericano Educación y Sociedad.

Flores-Lucero, M., & González Llanos, P. (2022). Propuesta de aplicabilidad aumentada en laboratorios de anatomía. International Humanities Review, 11. https://doi.org/10.37467/revhuman.v11.4019

Kamińska, D., Zwoliński, G., Laska-Leśniewicz, A., Raposo, R., Vairinhos, M., Pereira, E., Urem, F., Ljubić Hinić, M., Haamer, R.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

E., & Anbarjafari, G. (2023). Augmented reality: Current and new trends in education. Electronics, 12(16), Artículo 3531. https://doi.org/10.3390/electronics12163531

Koumpouros, Y. (2024). Revealing the true potential and prospects of augmented reality in education. Smart Learning Environments, 11, Artículo 2. https://doi.org/10.1186/s40561-023-00288-0

Lorenzo Lledó, G., Lorenzo-Lledó, A., & Lledó Carreres, A. (2022). Tendencias globales en el uso de la realidad aumentada en la educación: Estructura intelectual, social y conceptual. Revista de Investigación Educativa, 40(2), 475–493.

Maquilón Sánchez, J. J., Mirete Ruiz, A. B., & Avilés Olmos, M. (2017). La realidad aumentada (RA): Recursos y propuestas para la innovación educativa. Revista Electrónica Interuniversitaria de Formación del Profesorado, 20(2), 183–203. https://doi.org/10.6018/reifop.20.2.290971

Marín-Díaz, V., & Sampedro-Requena, B. E. (2020). La realidad aumentada en educación primaria desde la visión de los estudiantes. Alteridad, 15(1), 61–73. https://doi.org/10.17163/alt.v15n1.2020.05

Martínez Pérez, S., Fernández Robles, B., & Barroso Osuna, J. (2021). La realidad aumentada como recurso para la formación en la educación superior. Campus Virtuales, 10(1), 9–19.

Montecé-Mosquera, F., Verdesoto-Arguello, A., Montecé-Mosquera, C., & Caicedo-Camposano, C. (2017). Impacto de la realidad aumentada en el siglo XXI. European Scientific Journal, 13(25).

Paredes Agreda, D. M., Mero Chávez, J. L., Vera Arias, M. J., & Barahona Intriago, R. J. (2024). La realidad virtual y realidad aumentada en la educación. Revista Sinergia Académica, 7(3).

Prendes Espinosa, C. (2015). Realidad aumentada y educación: Análisis de experiencias prácticas. Pixel-Bit. Revista de Medios y Educación, (46), 187–203. https://doi.org/10.12795/pixelbit.2015.i46.12

Richter, A., Mohammadhossein, N., & Lukosch, S. (2022). Benefits of using augmented reality in learning settings: A systematic literature review. En Proceedings of the 43rd International Conference on Information Systems (ICIS 2022). Association for Information Systems.

Rodríguez Caldera, B. (2021). Realidad aumentada en educación primaria: Revisión sistemática. Edutec. Revista Electrónica de Tecnología Educativa, (77).

Urresta-Yépez, R. F. (2024). Realidad aumentada en educación superior y el análisis de sus beneficios y desafíos. Horizon Nexus Journal, 2(2), 57–70

Zaragoza Pérez, R., & Cuevas Escudero, A. L. (2020). Realidad aumentada en la enseñanza. Revista Digital Universitaria, 21(6). https://www.revista.unam.mx/wp-content/uploads/a9_Realidad-aumentada-en-la-ensenanza.pdf

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización	María Guadalupe Reyna Jiménez
2	Curación de datos	Karen Adriana Palomares Ibarra
3	Análisis formal	Mauricio Navarro Villalobos
4	Obtención de fondos	Zoila Delgadillo Delgadillo
5	Investigación	Karen Adriana Palomares Ibarra
6	Metodología	María Guadalupe Reyna Jiménez
7	Administración del proyecto	María Guadalupe Reyna Jiménez
8	Recursos	Karen Adriana Palomares Ibarra
9	Software	Sergio Favela Flores
10	Supervisión	María Guadalupe Reyna Jiménez
11	Validación	Mauricio Navarro Villalobos
12	Visualización	Karen Adriana Palomares Ibarra .
13	Redacción - borrador original	Karen Adriana Palomares Ibarra
14	Redacción - revisión y edición	María Guadalupe Reyna Jiménez .

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID044

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

AtenPsi: Diseño e Implementación de un Sistema Web para la Gestión Integral de la Atención Psicológica Estudiantil en Educación Superior

AtenPsi: Design and Implementation of a Web-Based System for the Comprehensive Management of Student Psychological Care in Higher Education

Rodríguez-Campos, F.E.[1]; Rodríguez-Lozano, K.V.[2]✉; Flores-Luévanos, M.G.[3]; García-Bautista, J.A.[4]; Herrera-García, J.C.[5],

Datos de Adscripción:

[1] Rodríguez Campos, Francisco Eduardo
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
francisco.rc@itslerdo.edu.mx
ORCID https://orcid.org/0000-0001-5276-3681

[2]✉ Rodríguez Lozano, Karla Verónica
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
karla.rl@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2832-4165

[3] Flores Luévanos, María Guadalupe
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
maria.fl@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2613-1431

[4] García Bautista, José Armando
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
armando.gb@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9105-241X

[5] Herrera García, José Carlos
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
herrerakarlos20@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0232-3451

Resumen **- La creciente demanda de servicios de atención psicológica en instituciones de educación superior ha evidenciado la necesidad de modernizar los procesos administrativos y clínicos asociados a la salud mental estudiantil. En este contexto, el presente estudio describe el diseño, desarrollo e implementación del Sistema de Atención Psicológica Estudiantil (AtenPsi) en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo (ITSL), orientado a optimizar la gestión del departamento de psicología. El diagnóstico inicial identificó que los procesos existentes se sustentaban en herramientas de ofimática y en registros físicos, lo que generaba redundancia de información, inconsistencias en la programación de citas, trazabilidad limitada de los expedientes clínicos y vulnerabilidades en la protección de datos sensibles. Este proyecto fue desarrollado con el patrón arquitectónico Modelo-Vista-Controlador (MVC), utilizando el framework Laravel y el sistema gestor de bases de datos MySQL. Esta integración permitió estructurar un sistema modular, escalable y seguro, facilitando la centralización de la información, la automatización del agendamiento de citas y la implementación de mecanismos de control de acceso mediante perfiles y permisos diferenciados. Los resultados evidencian una mejora significativa en la eficiencia operativa del departamento, reflejada en la reducción de la carga administrativa, la disminución de errores en la gestión de citas y el fortalecimiento de la confidencialidad de los expedientes clínicos. Asimismo, se espera que la implementación del sistema favorezca un seguimiento más preciso y oportuno de los estudiantes, contribuyendo a la calidad del servicio psicológico institucional.**

Palabras Clave: Gestión de citas médicas, Historia clínica electrónica, Salud mental estudiantil, Sistemas de información en salud.

Abstract **- The growing demand for psychological care services in higher education institutions has highlighted the need to modernize the administrative and clinical processes associated with student mental health. In this context, this study describes the design, development, and implementation of the Student Psychological Care System (AtenPsi) at the Instituto Tecnológico Superior de Lerdo (ITSL), aimed at optimizing the management of the psychology department. The initial diagnosis identified that existing processes relied on office tools and physical records, leading to information redundancy, inconsistencies in appointment scheduling, limited traceability of clinical records, and vulnerabilities in the protection of sensitive data. This project was developed using the Model-View-Controller (MVC) architectural pattern, employing the Laravel framework and the MySQL database management system. This integration enabled the development of a modular, scalable, and secure system, facilitating data centralization,**

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID045

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

automation of appointment scheduling, and the implementation of access control mechanisms through role-based permissions. The results demonstrate a significant improvement in the department's operational efficiency, reflected in the reduction of administrative workload, decreased errors in appointment management, and enhanced confidentiality of clinical records. Furthermore, the implementation of the system is expected to enable more accurate and timely monitoring of students, thereby contributing to the quality of the institutional psychological service.

Keywords: Appointment management, Clinical records, Model-View-Controller, Psychological care.

I. INTRODUCCIÓN

La salud mental de los estudiantes de nivel superior es una preocupación que va en aumento a nivel global. Mason et al. (2025) reportaron, en un estudio con 72,288 estudiantes de primer año de 77 universidades distribuidas en 18 países, que aproximadamente dos tercios de los participantes presentaban antecedentes de al menos un trastorno mental a lo largo de su vida, con una prevalencia del 57.4% en los últimos 12 meses. Esto evidencia que el trayecto en la universidad representa un periodo sensible para el inicio de trastornos mentales, entre los que destacan la depresión, la ansiedad y los trastornos relacionados con el consumo de sustancias.

En Latinoamérica, Cancino Cedeño et al. (2024) realizaron una revisión de 15 estudios desarrollados en países como México, Perú y Colombia, donde concluyen que la ansiedad, el estrés y la depresión son los problemas de salud mental más prevalentes entre universitarios y que su impacto se manifiesta principalmente en un rendimiento académico bajo o medio. En México, García Hernández et al. (2024) encontraron que el 78% de una muestra de 204 estudiantes universitarios presentaba altos niveles de ansiógenos educativos y que el 43% exhibía depresión moderada, con una correlación positiva y significativa entre ambas variables (r = 0.447). A nivel nacional, el interés en la salud mental universitaria resulta particularmente urgente, dado que la tasa de suicidio en México pasó de 6,494 casos en 2017 a 8,123 en 2022, con mayor incidencia en el rango de 20 a 34 años, grupo que coincide mayoritariamente con la población estudiantil de educación superior (SENDA-UNAM, 2024).

A pesar del incremento en los problemas de salud mental en los estudiantes, el acceso a servicios de atención psicológica institucional sigue siendo limitado. Taylor et al. (2024) documentaron que, en 2023, el 45.9% de los estudiantes universitarios reportó antecedentes de al menos un diagnóstico de trastorno mental, mientras que los servicios de consejería tradicionales en las instituciones no logran satisfacer la demanda creciente. Madrid-Cagigal et al. (2025) confirman que el incremento de la demanda de atención psicológica en instituciones de educación superior ha generado un acceso limitado para numerosos estudiantes con dificultades persistentes.

En las instituciones de educación superior en México, los departamentos de atención psicológica enfrentan una alta demanda, personal limitado y procesos administrativos manuales que generan retrasos en la atención y pérdida de seguimiento de los casos estudiantiles. Ante esta problemática, instituciones han iniciado la implementación de sistemas digitales de apoyo psicológico.

El Instituto Tecnológico Superior de Lerdo presenta esta misma situación, teniendo una creciente necesidad de modernizar el servicio de atención psicológica dirigido a sus estudiantes. Los procesos actualmente son manuales, basados en el registro de información mediante hojas de cálculo y archivos físicos y resultan insuficientes ante el incremento de la matrícula, generando demoras en la asignación de citas, sobrecarga administrativa, empalmes en la programación de sesiones, falta de trazabilidad en los expedientes clínicos y riesgos significativos en la seguridad de datos. Esta necesidad de modernización tecnológica limita la capacidad del departamento de psicología para ofrecer un seguimiento oportuno y personalizado, afectando tanto a los estudiantes que requieren apoyo como al personal psicológico que busca optimizar su labor. Para aminorar esta problemática, se propone el desarrollo de AtenPsi, una plataforma web para la gestión integral de la atención psicológica estudiantil, construida con el framework Laravel y el gestor de base de datos MySQL bajo el patrón arquitectónico Modelo-Vista-Controlador (MVC). Con ello, se busca centralizar la información, automatizar la asignación de citas, garantizar la confidencialidad de los expedientes y permitir que el personal psicológico se enfoque en la atención directa al estudiante.

Se debe tomar en cuenta lo que identifican Cho et al. (2025) en su artículo "*Barriers to digital mental health services among college students",* que la adopción de sistemas digitales en salud mental presenta nueve barreras principales que impiden a los estudiantes universitarios acceder a los servicios de atención psicológica disponibles, como lo son la falta de interacción humana y calidez en la comunicación digital, junto con la poca personalización y falta de claridad en el contenido de las plataformas. Asimismo, las preocupaciones sobre la privacidad y desconfianza en la precisión de los servicios en línea y las limitaciones de tiempo y horarios debido a las cargas académicas. Se suman los altos costos y barreras financieras, el estigma hacia los tratamientos farmacológicos y la difícil accesibilidad a los recursos físicos. Finalmente, influyen factores personales como el miedo al juicio social y la preferencia por la autosuficiencia, además de la necesidad de una mayor empatía y afinidad cultural en la interacción con los consejeros.
Estas barreras permiten identificar que no basta con ofrecer servicios de atención, sino que es necesario rediseñar la forma en que dichos servicios se gestionan.

El sistema web de gestión AtenPsi interviene directamente sobre tres de ellas, reduce las restricciones de tiempo al permitir la solicitud y programación de citas en cualquier momento y desde cualquier dispositivo; atiende las preocupaciones de privacidad mediante controles de acceso por roles que garantizan la confidencialidad de los expedientes; y mejora la accesibilidad a

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID045

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

los recursos al centralizar en una sola plataforma la información sobre los servicios disponibles, los horarios de atención y el estado de seguimiento de cada caso. Elkhodr et al. (2024), en su propuesta de un marco de tecnología asistida para el bienestar estudiantil, señalan que funciones como la autoevaluación, el acceso rápido a recursos, la integración cultural y el seguimiento personalizado son componentes esenciales de cualquier herramienta digital orientada a la salud mental universitaria, y que la participación activa de los estudiantes en el diseño incrementa la adopción y sostenibilidad del sistema a largo plazo.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

El Sistema de Atención Psicología Estudiantil (AtensPsi) es una plataforma web que permite digitalizar los expedientes y optimizar la gestión de las citas, para lograr que el personal pueda brindar una mejor atención a los alumnos. Este sistema fue desarrollado bajo el patrón arquitectónico Modelo-Vista-Controlador (MVC), implementado mediante el framework Laravel en su versión para PHP y el gestor de base de datos MySQL. Esta combinación de tecnologías responde a una separación entre la lógica de negocio, la presentación visual y el control del flujo de datos, lo que favorece la escalabilidad, el mantenimiento y la seguridad del sistema. El frontend fue construido con HTML, CSS, Bootstrap y JavaScript, asegurando una interfaz responsiva y compatible con múltiples dispositivos y navegadores, lo que permite al personal psicológico y a los estudiantes acceder al sistema tanto desde equipos de cómputo institucionales como desde dispositivos móviles. El despliegue del sistema se realizó en la infraestructura de servidores locales del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, utilizando Docker como plataforma de contenedorización para empaquetar la aplicación con todas sus dependencias y garantizar un entorno de ejecución aislado, seguro y reproducible. El control de versiones del código fuente se gestionó mediante Git y GitLab, lo que permitió registrar el historial de cambios, facilitar el trabajo colaborativo y gestionar las versiones del proyecto de manera ordenada.

2.1 Metodología

Para el desarrollo del sistema se adoptó un enfoque híbrido que combina el modelo en Cascada con el marco de trabajo Scrum. Esto obedece a que el proyecto presentaba necesidades de naturaleza distinta según la etapa. Por una parte, la gestión de expedientes clínicos implica el tratamiento de datos personales sensibles, lo que exige definir con precisión los requerimientos poco susceptibles a cambios, por lo que el modelo en Cascada permitió tener una planificación secuencial y la documentación formal. Por otra parte, la interacción con las interfaces y los flujos de atención del departamento de psicología requerían validación continua con los usuarios finales, condición en la que los marcos ágiles resultan más apropiados por su capacidad de incorporar retroalimentación de manera incremental.

En la fase inicial del proyecto, se utiliza la metodología en cascada, la cual tiene un enfoque secuencial y progresivo, donde el desarrollo se divide en fases estrictas. Su regla principal es que una etapa debe completarse en su totalidad antes de avanzar a la siguiente. Esta metodología permite lograr una mejor comprensión de los requerimientos desde un inicio, brindando una base sólida, estructurada y bien planificada para la construcción del sistema (Sandoval-Acosta et al., 2024). El proyecto se estructuró en cinco fases secuenciales: análisis, diseño, codificación, pruebas y despliegue, garantizando que cada etapa fuera completada antes de avanzar a la siguiente.

La metodología SCRUM se emplea en las fases de la construcción y ejecución del proyecto. Esta metodología se caracteriza por ser dinámica, centrada en trabajos en equipos interdisciplinarios y autoorganizados que desarrollan el proyecto mediante iteraciones cortas, denominadas sprints. Con este enfoque iterativo se tiene una colaboración constante y efectiva, permitiendo adaptar el software a posibles cambios en los requisitos para, de esta manera, minimizar los riesgos de fracaso y garantizar una entrega constante, funcional y de calidad del software (Schwaber & Sutherland, 2020). Scrum permitió organizar el trabajo en *sprints* de una a cuatro semanas, con roles definidos —*Scrum Master*, equipo de desarrollo y *Product Owner*— y reuniones periódicas de revisión que facilitaron la detección oportuna de errores y la incorporación de retroalimentación del departamento de psicología del ITSL

La combinación de estas dos metodologías, Cascada y SCRUM, permitió una planificación minuciosa y una documentación formal en las primeras fases, así como la ejecución de una programación iterativa y adaptable. (Porras Aguirre et al., 2025). De esta manera, el enfoque híbrido buscó establecer una base estructural sólida para el manejo de información sensible, disminuir los riesgos asociados a cambios tardíos en el modelo de datos y mantener entregas funcionales periódicas al departamento de psicología.

2.2 Marco Tecnológico

El desarrollo del sitio web se sustenta en un conjunto de tecnologías, patrones arquitectónicos y herramientas de desarrollo, los cuales fueron seleccionados por criterios de robustez, seguridad y escalabilidad. A continuación, se describe cada componente técnico con base en la literatura especializada referenciada en el proyecto.

Patrón Modelo-Vista-Controlador (MVC)

Es un patrón de arquitectura de software que consiste en disociar la lógica del negocio de la interfaz del usuario, evitando así la combinación desordenada de distintos lenguajes de programación en un mismo código fuente (Bahit, 2011). Fernández Romero y Díaz González (2012) describen el Modelo como el núcleo del sistema, responsable del procesamiento de los datos, caracterizado por su autonomía respecto a la vista y al controlador. Sommerville (2011) define la Vista como el componente que gestiona la presentación de los datos al usuario, transformando la información proveniente del modelo mediante una representación visual que refleja cualquier cambio de estado en la interfaz. Por su parte, Larman (2003) concibe el Controlador como el primer componente que opera detrás de la interfaz, encargado de recibir y gestionar los eventos generados en el sistema.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID045

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Laravel y PHP

PHP es un lenguaje de scripting e intérprete del lado del servidor que se incrusta en HTML, con una sintaxis similar a C, Java y Perl, cuyo objetivo es permitir a los desarrolladores web escribir páginas generadas dinámicamente de forma rápida (Cobo et al., 2005). El framework principal del sistema es Laravel. Stauffer (2023) lo define como un. Laravel es un framework de desarrollo rápido de aplicaciones para PHP, cuyo objetivo es proporcionar una sintaxis que permita escribir código simple y legible, ofreciendo herramientas robustas para tareas comunes como la autenticación, el enrutamiento y el almacenamiento en caché, facilitando la estructuración del código mediante una arquitectura basada en controladores, modelos y vistas que promueve la reutilización y el mantenimiento del sistema a largo plazo (Stauffer, 2023; Sinha, 2019).

Bases de datos

Una base de datos relacional es un conjunto de datos relacionados entre sí que proporciona información a los usuarios y que permite transacciones de inserción, eliminación y actualización de datos (Arias, 2014). Para el desarrollo de esta aplicación se utilizó este esquema con el gestor de MySQL. MySQL es un gestor de base de datos relacional de código abierto. Tiene como función principal permitir la creación, el guardado y la búsqueda de información usando tablas que se conectan entre sí. Todo el manejo de datos lo hace de manera rápida, segura y ordenada (Morales, 2023).

Migraciones

El control del esquema de base de datos fue gestionado mediante migraciones. Una migración es un script o conjunto de instrucciones codificadas que altera el esquema de las bases de datos de manera controlada, permitiendo transitar el esquema de una versión a otra de forma sincronizada con el código de la aplicación, de modo que los equipos puedan trabajar de forma autónoma y refactorizar la base de datos sin interrumpir el desarrollo (Sadalage & Fowler, 2016).

HTML, CSS y Bootstrap

La capa de presentación de AtenPsi fue construida con HTML, CSS y Bootstrap. Freeman (2011) define HTML (HyperText Markup Language) como un lenguaje de marcado estándar utilizado para describir la estructura y el contenido de los sitios web mediante etiquetas y atributos que indican al navegador qué debe mostrar. Meyer y Weyl (2017) describen CSS como un lenguaje diseñado para definir la apariencia visual de documentos desarrollados en lenguajes de marcado como HTML, cuyo objetivo es facilitar la distinción entre el contenido estructural y semántico y el aspecto visual de la interfaz. Finalmente, Spurlock (2013) define Bootstrap como un framework de desarrollo frontend gratuito y de código abierto, diseñado para facilitar la creación de sitios y aplicaciones web con diseño responsivo.

Librerías clave

Para el módulo de citas se integraron tres componentes especializados. TimeGrid es un componente de visualización que organiza eventos mediante una cuadrícula, mostrando uno o más días de forma horizontal con un eje de tiempo en el eje vertical (FullCalendar, 2025). La librería Calendar Links es una herramienta diseñada para la generación de hipervínculos de interoperabilidad con sistemas de gestión de tiempo, que permite crear enlaces que precargan la información en los calendarios más utilizados (Spatie, 2025a), mientras que Opening Hours es un componente que permite modelar de forma estructurada los intervalos de tiempo de atención de una entidad, facilitando la consulta y gestión de horarios operativos (Spatie, 2025b).

Control de Versiones

El control de versiones del proyecto fue gestionado con Git, el cual es un sistema de control de versiones distribuido diseñado para manejar todo tipo de proyectos y el historial de cambios realizados, revisiones y metadatos asociados dentro de un repositorio (Chacón & Straub, 2014).

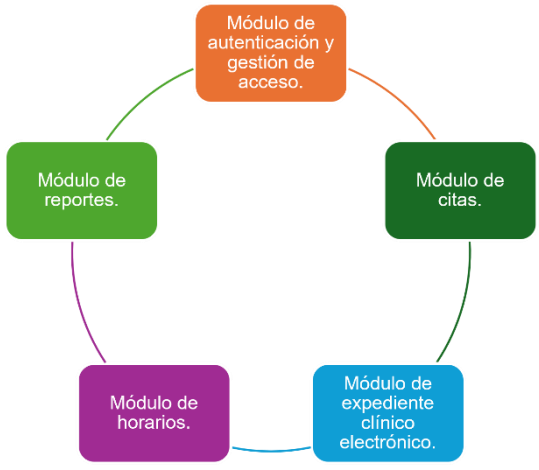
Contenedores

Un contenedor es un mecanismo de virtualización a nivel de sistema operativo que permite ejecutar aplicaciones de manera aislada y segura empaquetando la aplicación con todas sus dependencias (Turnbull, 2014). El despliegue del sistema fue realizado mediante contenedores implementados en Docker, que es una plataforma de desarrollo, envío y ejecución de aplicaciones que opera como un motor de virtualización a nivel de sistema operativo que contiene instrucciones diseñadas para automatizar la creación de la imagen del contenedor (Poulton, 2023; Kane & Matthias, 2023).

2.3 Módulos del sistema

El sistema web AtenPsi integra cinco módulos funcionales definidos a partir de los requerimientos de los usuarios del departamento de psicología. En la figura 1, se muestra el diagrama de los modelos.

Figura 1
Módulos del sistema web AtenPsi



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID045

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1) El módulo de autenticación y gestión de acceso permite el registro e inicio de sesión de usuarios con credenciales individuales, la recuperación de contraseñas mediante un token enviado al correo electrónico institucional y el control de acceso diferenciado por roles, garantizando que cada usuario únicamente visualice y opere las funcionalidades correspondientes a su perfil.
2) El módulo de citas permite al estudiante seleccionar de forma autónoma el día y la hora de atención a partir del calendario de disponibilidad registrado por el psicólogo, capturar su información de identificación y recibir una confirmación automática por correo electrónico. El componente de visualización del calendario fue implementado con el componente TimeGrid, mientras que la integración con calendarios externos se realizó mediante la librería Spatie Laravel Calendar Links, y la gestión de los horarios operativos del psicólogo se implementó con Spatie Opening Hours.
3) El módulo de expediente clínico electrónico es el componente central del sistema. Estructurado en formularios progresivos validados por controladores de Laravel, el expediente integra doce secciones: datos personales, datos escolares, datos de contacto, historial del problema actual, antecedentes personales, antecedentes familiares, examen de estado mental (tres partes), área académica, área social, área emocional, diagnóstico y preguntas finales. Cada sección establece una relación de uno a uno con la tabla principal de expedientes en la base de datos, a excepción de la sección de antecedentes familiares, que incorpora una relación en cadena para registrar los distintos miembros del núcleo familiar del estudiante.
4) El módulo de horarios permite al psicólogo registrar sus días y horas de atención disponibles e indicar ausencias, información que se refleja automáticamente en el calendario del módulo de citas para que los estudiantes únicamente puedan agendar en los horarios habilitados.
5) El módulo de reportes permite al psicólogo generar y descargar en formato PDF el historial consolidado de los estudiantes atendidos, restringiendo el acceso a esta funcionalidad exclusivamente al perfil de psicólogo mediante el sistema de perfiles y permisos del sistema.

2.4 Funcionalidades del sistema

Diseño de la base de datos

La base de datos relacional fue diseñada en MySQL y modelada mediante MySQL Workbench. El esquema incluye diecinueve tablas interrelacionadas. La tabla expediente actúa como entidad central del esquema, vinculada mediante relaciones de uno a uno con cada una de las tablas de secciones clínicas. La tabla de citas mantiene relaciones de uno a muchos tanto con el alumno como con el psicólogo, registrando el historial completo de sesiones programadas. Las migraciones de Laravel garantizaron la evolución controlada del esquema durante el desarrollo, y los seeders permitieron poblar la base de datos con información de prueba para la validación funcional del sistema.

Requerimientos no funcionales

En materia de seguridad, el sistema implementa encriptación de contraseñas y protección de datos personales sensibles mediante el sistema de perfiles y permisos, asegurando que únicamente el psicólogo acceda a los expedientes clínicos. La plataforma cumple con los requerimientos de compatibilidad multiplataforma al ser accesible desde cualquier dispositivo con navegador web, y su arquitectura MVC sobre Laravel facilita la incorporación de nuevas funcionalidades sin comprometer la estabilidad del sistema existente.

Pruebas y validación

Previo al despliegue definitivo, el sistema fue sometido a pruebas de estrés y pruebas de carga, mediante las cuales se simuló la interacción simultánea de múltiples usuarios para evaluar la estabilidad y el rendimiento del sistema bajo diferentes niveles de tráfico. Los errores detectados durante esta fase fueron corregidos antes de la implementación en los servidores institucionales.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Alcance funcional del sistema

Para determinar el alcance funcional de AtenPsi, se realizó un análisis de los requerimientos del departamento de psicología del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo (ITSL). Dicho análisis se efectuó mediante reuniones semanales, visitas presenciales al área y revisión de los documentos físicos empleados en los procesos de atención, evidenciando que el departamento dependía de herramientas de ofimática, principalmente hojas de cálculo y archivos físicos, lo que provocaba redundancia de información, empalmes de citas, falta de trazabilidad en los expedientes clínicos y riesgos en la seguridad de datos sensibles de los estudiantes.

Como resultado del análisis, se elaboraron diagramas de casos de uso que definieron los dos actores principales del sistema: el alumno y el psicólogo, así como las funciones específicas de cada uno. Para el alumno, el sistema contempla las acciones de inicio de sesión, recuperación de contraseña, agendamiento de cita mediante selección de fecha y hora disponibles en el calendario interactivo, confirmación automática por correo electrónico y consulta del historial de sesiones desde su perfil (Figura 2).

Para el psicólogo, el sistema concentra las operaciones de mayor complejidad clínica y administrativa: creación y actualización del expediente clínico del alumno, registro del motivo de consulta y diagnóstico, programación del horario de atención con marcado de días disponibles y ausencias, programación de la próxima cita y generación de reportes descargables en formato PDF (Figura 3).

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID045

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 2
Diagrama de casos de uso – vista del alumno

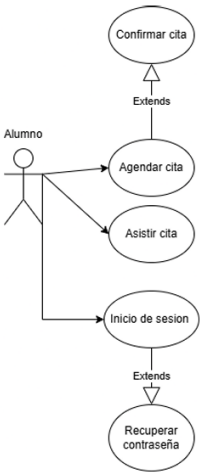


Figura 3
Diagrama de casos de uso – vista del psicólogo



Los diagramas de flujo presentados en las figuras 4 y 5 complementan el modelo de casos de uso al representar la secuencia operativa de los procesos principales. En el flujo del alumno (Figura 4) se distinguen dos rutas: la primera visita, en la que se captura la información personal y el motivo de consulta, y las citas de seguimiento, en las que se verifica el expediente preexistente. En ambos casos, el alumno selecciona el día y la hora de la sesión mediante el calendario interactivo y recibe la confirmación por correo electrónico. El flujo del psicólogo (Figura 5) describe el proceso clínico completo: desde la verificación o creación del expediente en la primera sesión hasta la actualización del mismo en sesiones posteriores y la generación de reportes de seguimiento.

Figura 4
Diagrama de flujo – Alumno

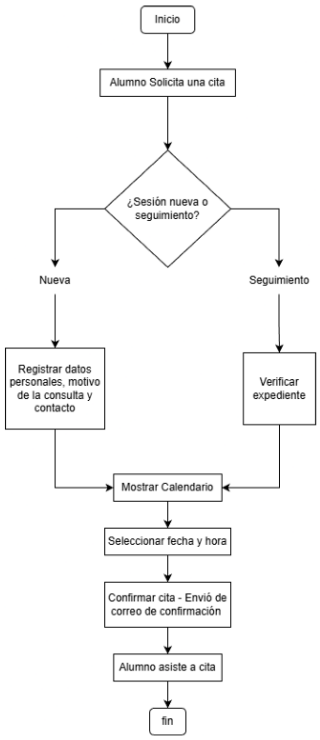
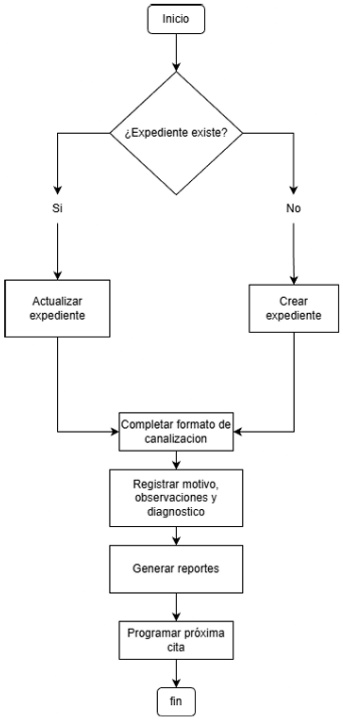


Figura 5
Diagrama de flujo – Psicólogo



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID045

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

3.2 Construcción del Sistema

Arquitectura y navegación

En la etapa de construcción se elaboraron los diagramas que representan la arquitectura interna y la navegación del sistema. Los mapas de navegación (Figuras 6 y 7) documentan las rutas de interacción disponibles para cada rol. Para el alumno, el sistema expone tres secciones principales desde la pantalla de inicio: creación de citas, visualización del calendario mensual y consulta del perfil con historial de sesiones. Para el psicólogo, las secciones disponibles son: gestión de expedientes clínicos, visualización del calendario con estado detallado de cada cita y registro del horario de atención.

Figura 6
Diagrama Mapa de Navegación de Alumnos

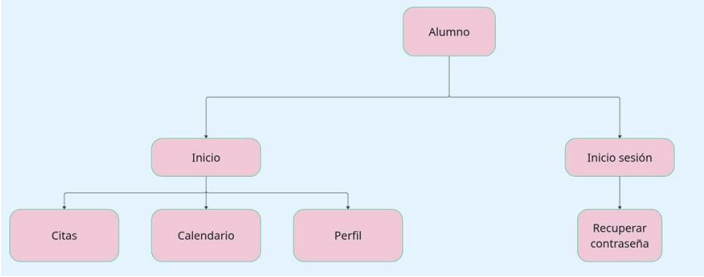
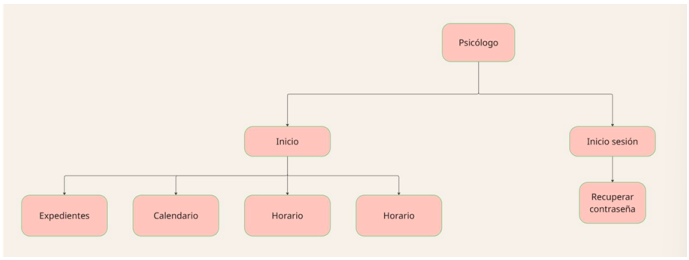


Figura 7
Diagrama Mapa de Navegación de Psicólogo



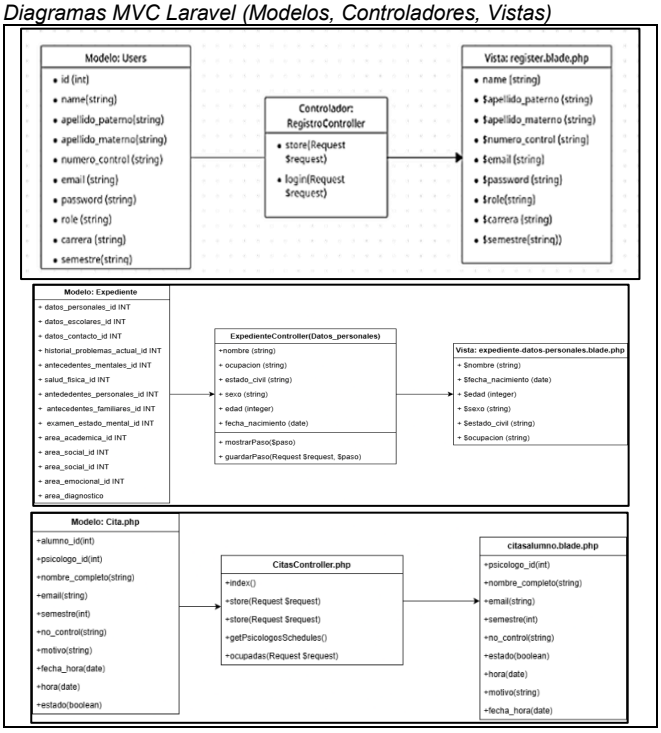
Diseño de la base de datos

El diseño de la base de datos relacional, modelado en MySQL, comprende diecinueve tablas interrelacionadas. La tabla expediente opera como entidad central del esquema y mantiene relaciones de uno a uno con cada una de las secciones clínicas: datos_personales, datos_escolares, datos_contacto, historial_problema_actual, antecedentes_personales, antecedentes_familiares, examen_estado_mental, area_academica, area_social, area_emocional y diagnóstico. La tabla citas establece relaciones de uno a muchos tanto con la tabla alumno como con la tabla psicólogo, registrando el historial completo de sesiones programadas. La tabla citas_canceladas mantiene una relación de uno a uno con citas, preservando el registro histórico de las cancelaciones. La tabla horario_atencion_semanal mantiene una relación de uno a muchos con psicólogos, almacenando los distintos horarios disponibles para cada profesional. Este diseño responde a la integridad referencial de los datos clínicos y la trazabilidad completa del proceso de atención desde la primera sesión hasta el alta del estudiante, en concordancia con los estándares del expediente clínico electrónico documentados por Cerón Solís (2024).

Arquitectura MVC con Laravel

La arquitectura MVC del sistema, implementada con el framework Laravel, estructura los módulos principales en tres capas interoperables (Figura 8). Los modelos representan las tablas de la base de datos y gestionan el acceso seguro a la información mediante Eloquent ORM. Los controladores encapsulan la lógica de negocio y coordinan las operaciones del sistema, actuando como intermediarios entre los datos y las interfaces. Las Vistas, construidas con HTML, CSS, Bootstrap y JavaScript, conforman las pantallas con las que interactúan alumnos y psicólogos. Esta separación de responsabilidades favorece el mantenimiento del sistema y su escalabilidad hacia nuevas funcionalidades, manifestada por Enríquez et al. (2023) respecto del impacto del patrón MVC en la seguridad e interoperabilidad de los sistemas informáticos.

Figura 8
Diagramas MVC Laravel (Modelos, Controladores, Vistas)



3.3 Interfaces del Sistema en Producción

Concluidas las fases de análisis, diseño y modelado, se procedió a la etapa de codificación e implementación. El sistema cuenta con una interfaz multiplataforma responsiva construida con HTML, CSS, Bootstrap y JavaScript, lo que garantiza su accesibilidad desde cualquier equipo disponible.

El acceso al sistema se gestiona mediante una pantalla de autenticación para ambos roles, en la que el usuario ingresa sus credenciales para acceder a las funcionalidades que le

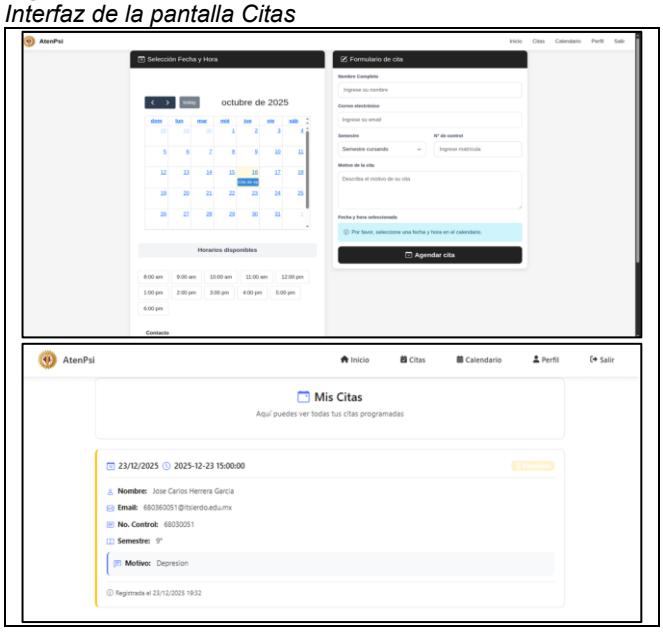
Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID045

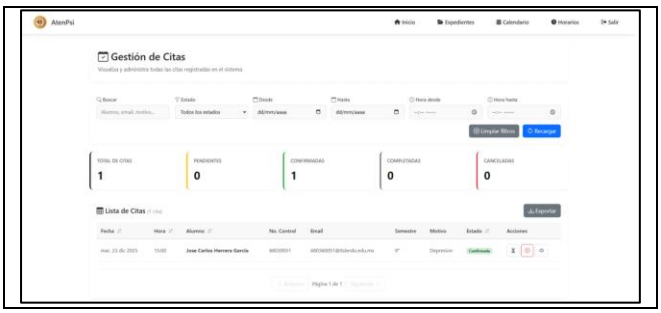
This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

corresponden según su perfil. El sistema contempla adicionalmente un proceso de registro de nuevos usuarios y un mecanismo de recuperación de contraseña mediante un token de restablecimiento enviado al correo electrónico, implementado con la funcionalidad nativa de Laravel para la gestión segura de credenciales. Una vez autenticado, el sistema redirige automáticamente al usuario a su pantalla de inicio; el alumno accede a las opciones de creación de cita, visualización del calendario y consulta de su perfil personal, mientras que el psicólogo accede a la gestión de expedientes clínicos, el calendario de sesiones y el registro de horarios de atención.

El módulo de gestión de citas es una de las funcionalidades centrales del sistema. La pantalla de agendamiento integra en una sola vista el formulario de captura de datos del alumno y el calendario interactivo construido con FullCalendar TimeGrid, que despliega únicamente las franjas horarias habilitadas por el psicólogo mediante el componente Spatie Opening Hours. Una vez confirmada la cita, el sistema envía un correo electrónico de confirmación con un enlace para agregar la sesión al calendario personal del alumno, funcionalidad implementada con Spatie Calendar Links. El calendario del alumno muestra las citas agendadas en vista semanal, mientras que el calendario del psicólogo presenta una vista tabular con la información del alumno y el estado detallado de cada cita: pendiente, confirmada, completada o cancelada. Esta automatización elimina los empalmes de citas y los errores de programación manuales identificados en el diagnóstico institucional. El módulo de horarios permite al psicólogo registrar sus días de atención disponibles y marcar ausencias, información que se refleja en tiempo real en el calendario de agendamiento del alumno. Estas funcionalidades se muestran en la figura 9.

Figura 9
Interfaz de la pantalla Citas





El expediente clínico electrónico está organizado en doce secciones progresivas validadas por controladores Laravel, registra de forma estructurada la información completa del estudiante: datos personales, datos escolares, datos de contacto, historial del problema actual, antecedentes personales, antecedentes familiares, examen de estado mental en tres partes (orientación y apariencia, procesamiento del pensamiento y memoria, e impulsos y toma de decisiones), área académica, área social, área emocional, diagnóstico y preguntas finales de valoración del servicio. El área emocional incluye preguntas específicas, lo que permite la detección temprana de casos prioritarios, y la sección de diagnóstico fortalece las observaciones clínicas, las recomendaciones de canalización y los resultados de pruebas psicométricas. Finalmente, la pantalla de perfil del alumno le permite consultar su información de registro y el historial consolidado de sus citas, mientras que el módulo de reportes genera y descarga en formato PDF el historial de los alumnos atendidos, con acceso exclusivo para el perfil de psicólogo mediante el sistema de perfiles y permisos del sistema (figura 10).

Figura 18
Interfaz de la pantalla expediente



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID045

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

3.4 Discusión

Las funcionalidades desarrolladas en el sistema web AtenPsi se alinean con los hallazgos de investigaciones previas sobre la efectividad de los sistemas de gestión digital en la atención psicológica universitaria. Vincze et al. (2026) documentaron que un sistema de gestión de salud mental en la Universidad de Debrecen fue utilizado activamente por el 29% de sus 29,045 estudiantes en un periodo de 45 meses, lo que sugiere que la disponibilidad de una plataforma digital puede incrementar el acceso a los servicios psicológicos institucionales. Asimismo, Lutz-Kopp et al. (2021) también documentaron que el portal en línea desarrollado para la gestión de recursos de salud mental en la Universidad Johannes Gutenberg registró 5,739 visitantes y 16,495 visualizaciones de página en ocho meses de operación, evidencia de la disposición de los estudiantes a utilizar este tipo de herramientas. Con base en estos antecedentes, AtenPsi incorpora un calendario interactivo con disponibilidad en tiempo real, eliminando la barrera de restricción de tiempo señalada por Cho et al. (2025) como uno de los principales obstáculos para el acceso estudiantil a los servicios de salud mental, mientras que la confirmación automática por correo electrónico reduce la tasa de ausentismo en las citas.

La digitalización del expediente clínico responde a la necesidad documentada por Cerón Solís (2024), quien demostró que los expedientes clínicos electrónicos en servicios de salud mental universitarios mejoran la calidad de la atención al proporcionar al profesional un historial completo, accesible y auditable del estado del estudiante. La gestión operativa del departamento de psicología del ITSL se encontraba limitada por la dependencia de archivos físicos y herramientas de ofimática que generaban redundancia de datos y falta de trazabilidad. El sistema propuesto transforma este modelo al centralizar toda la información clínica en una base de datos relacional con control de acceso por roles.

La selección de las tecnologías para este proyecto tiene respaldo en Morales (2023), quien sostiene que el framework Laravel garantiza una gestión eficiente y segura de la información sensible. El sistema de perfiles y permisos implementado permite que únicamente el personal acreditado acceda a los expedientes clínicos, cumpliendo con los estándares de seguridad y confidencialidad descritos por Mental Test Lab (2024) como requisitos fundamentales de las plataformas de historia clínica digital.

Por su parte, Fernández Marín y González Tolmo (2022) demostraron que los sistemas informáticos para la gestión de citas e historial médico generan mejoras en la eficiencia operativa de los servicios de salud institucionales. En concordancia con dichos hallazgos, AtenPsi automatiza los procesos de agendamiento, registro clínico y generación de reportes que anteriormente se realizaban de forma manual. Asimismo, se espera que la implementación del sistema favorezca un seguimiento más preciso y oportuno de los estudiantes, contribuyendo a la calidad del servicio psicológico institucional.

Es importante señalar que el sistema AtenPsi está actualmente en fase de implementación, por lo que los beneficios que se describen corresponden a efectos esperados derivados del diseño y de la evidencia reportada en la literatura, y no a resultados medidos en el contexto del ITSL. Como trabajo futuro, se contempla evaluar el impacto del sistema mediante indicadores como la tasa de asistencia a citas, el tiempo promedio de agendamiento, la completitud de los expedientes y la usabilidad percibida por el personal de psicología y los estudiantes.

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación de este proyecto representa una contribución a la modernización de los servicios de atención psicológica estudiantil en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. La plataforma propone sustituir un proceso manual y susceptible a errores por un sistema digital que centraliza la gestión de citas, los expedientes clínicos y los reportes institucionales en una sola interfaz, accesible para alumnos y psicólogos desde cualquier dispositivo con acceso a un navegador web.

La implementación del patrón MVC mediante el framework Laravel y la base de datos MySQL permitió desarrollar un sistema escalable, mantenible y con controles de seguridad adecuados para el manejo de información sensible. El esquema relacional de diecinueve tablas relacionadas garantiza la integridad de los datos y la trazabilidad del proceso de atención. Asimismo, la integración de librerías especializadas dotó al módulo de citas de funcionalidades que automatizan la comunicación entre el alumno y el departamento, con el propósito de atender los principales cuellos de botella identificados en el proceso manual.

La combinación de las metodologías de Cascada y Scrum demostró ser adecuada para este proyecto de desarrollo de software. El modelo en Cascada proporcionó la estructura documental y la planificación necesarias en las etapas de análisis y diseño, mientras que Scrum permitió una construcción iterativa y adaptable que incorporó retroalimentación continua durante el desarrollo.

Considerando que el sistema se encuentra en fase de implementación, se espera su impacto en tres dimensiones: en primer lugar, la disminución de la carga administrativa del psicólogo, lo que le permitiría destinar mayor tiempo a la atención directa del estudiante; en segundo lugar, una mayor accesibilidad del estudiante a los servicios psicológicos, al disponer de un calendario autónomo de citas con visualización en tiempo real de la disponibilidad del profesional; y, por último, el fortalecimiento de la seguridad y trazabilidad de los expedientes clínicos, al trasladar su gestión de archivos físicos a un entorno digital con almacenamiento seguro de contraseñas y control de acceso diferenciado por roles.

Como líneas de trabajo futuras, se identifica, en primer término, la evaluación del impacto del sistema una vez concluida su implementación, mediante indicadores como la tasa de asistencia a citas, el tiempo promedio de agendamiento y la usabilidad percibida por los usuarios; en segundo término, la incorporación de un módulo de estadísticas y visualización de datos que permita al departamento analizar patrones de salud mental en la población estudiantil y diseñar estrategias de intervención basadas en evidencia, y finalmente, el reforzamiento de la seguridad del sistema mediante capas adicionales de protección para los expedientes clínicos, dado el alto grado de confidencialidad de la información que gestiona. Una vez validado, el sistema podría ser replicado en otras instituciones de

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID045

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

educación superior dentro y fuera del sistema TecNM que enfrenten problemáticas similares en sus departamentos de atención psicológica, ampliando su potencial de impacto más allá del contexto institucional.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Psicología y a la Subdirección de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por las facilidades institucionales y los recursos proporcionados para la realización de este proyecto. Se extiende un reconocimiento especial al Dr. Jesús Alejandro Valdés Nieblas, titular de dicha Subdirección, por su orientación académica y su apoyo continuo a cada uno de los integrantes del equipo a lo largo del desarrollo de este proyecto.

VI. REFERENCIAS

Albarracín Zambrano, L. O., Cruz Vera, D. M., & Gutiérrez Guzmán, A. M. (2025). Aplicación web para la gestión y agendamiento de citas en el consultorio Achilie fisioterapeuta, Ecuador. Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas, 44. https://revibiomedica.sld.cu/index.php/ibi/article/view/3814

Álvarez, J., et al. (2023). Revisión de Framework Laravel y su aplicación en sistema web de mesa de ayuda. Innovación y Desarrollo Tecnológico Revista Digital, 15(1), 153–160.

Arias, Á. (2014). Bases de datos con MySQL. IT Campus Academy.

Bahit, E. (2011). POO y MVC en PHP: El paradigma de la programación orientada a objetos en PHP y el patrón de arquitectura de software MVC. Lulu. https://www.lulu.com/es/shop/eugenia-bahit/poo-y-mvc-en-php/ebook/product-14ngjz7d.html

Cancino Cedeño, E. M., Párraga Mendoza, J. H., & Castillo Peña, D. (2024). Revisión sistemática sobre salud mental y rendimiento académico. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 8(2), 1833–1851.

Cerón Solís, O. (2024). Estudio de caso sobre la implementación del expediente clínico electrónico en la Clínica de Psiquiatría y Salud Mental de la UNAM. Revista Anales de Medicina Universitaria, 3(1), 29–37. https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2021/noviembre/0820055/Index.html

Chacon, S., & Straub, B. (2014). *Pro Git* (2.ª ed.). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-0076-6

Cho, H. N., Jung, K., Eisenberg, D., King, C. A., & Zheng, K. (2025). Barriers to digital mental health services among college students. Proceedings of MIE 2025. IOS Press. https://doi.org/10.3233/SHTI251041

Cobo, Á., Gómez, P., Pérez, D., & Rocha, R. (2005). PHP y MySQL: Tecnologías para el desarrollo de aplicaciones web. Ediciones Díaz de Santos. https://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479787066.pdf

Cucho Hidalgo, Y. F., & Luján Johnson, G. L. (2023). Gestión operativa del servicio de salud mental para el desarrollo del bienestar psicológico en universitarios pospandemia. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7(1), 4481–4503. https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/4481

Elkhodr, M., Gide, E., & Pandey, N. (2024). Enhancing mental health support for international students: A digital framework for holistic well-being in higher education. STEM Education, 4(4), 466–488. https://doi.org/10.3934/steme.2024025

Enríquez, F., Yar Salto, M., & Revelo Sánchez, O. (2023). Impacto del patrón modelo vista controlador (MVC) en la seguridad, interoperabilidad y usabilidad de un sistema informático durante su ciclo de vida. EASI: Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Industria, 2(1), 11–16. https://doi.org/10.53591/easi.v2i1.2043

Fernández Marín, M. Á., & González Tolmo, D. (2022). Sistema informático web para la gestión de citas e historial médico de pacientes. Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas, 5(1), 179–187. https://doi.org/10.62452/p6haje75

FullCalendar. (2025). TimeGrid view. FullCalendar Documentation. https://fullcalendar.io/docs/timegrid-view

García Hernández, A. B. M., Rivera Morales, M. T., & Guajardo Espinoza, J. M. (2024). Ansiógenos educativos y depresión en estudiantes universitarios de México. *Políticas Sociales Sectoriales, 2*(3), 265–286.

Herrera Evia, B. (2024). La atención studios y Perspectivas Revista Científica y Académica, 4(2), 2101–2123. https://estudiosyperspectivas.org/index.php/EstudiosyPerspectivas/article/view/354

Kane, S. P., & Matthias, K. (2023). *Docker: Up & running: Shipping reliable containers in production* (3.ª ed.). O'Reilly Media.

Larman, C. (2003). UML y patrones: Una introducción al análisis y diseño orientado a objetos y al proceso unificado (2.ª ed.). Pearson Educación.

Lutz-Kopp, C., Luka-Krausgrill, U., Honsbrok, B., Meinhardt-Injac, B., & Gropalis, M. (2021). Development, implementation and first evaluation of an online portal to promote the mental health of university students (me@JGU). International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(3), 1179. https://doi.org/10.3390/ijerph18031179

Madrid-Cagigal, A., Kealy, C., Potts, C., Mulvenna, M. D., Byrne, M., Barry, M. M., & Donohoe, G. (2025). Digital mental health interventions for university students with mental health difficulties: A systematic review and meta-analysis. Early Intervention in Psychiatry, 19(3), e70017. https://doi.org/10.1111/eip.70017

Mason, A., Rapsey, C., Sampson, N., Lee, S., Albor, Y., Al-Hadi, A. N., Alonso, J., Al-Saud, N., Altwaijri, Y., Andersson, C., Atwoli, L., Auerbach, R. P., Ayuya, C., Báez-Mansur, P. M., Ballester, L., Bantjes, J., Baumeister, H., Bendtsen, M., Benjet, C., Berman, A. H., . . . Bruffaerts, R. (2025). Prevalence, age-of-onset, and course of mental disorders among 72,288 first-year university students from 18 countries in the World Mental Health International College Student (WMH-ICS) initiative. Journal of Psychiatric Research, 183, 225–236.

Mental Test Lab. (2024). Historia clínica digital: Seguridad y eficiencia en tu consultorio. Mental Test Lab.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

https://mentaltestlab.com/historia-clinica-digital-seguridad-y-eficiencia-en-tu-consultorio/

Meyer, E. A., & Weyl, E. (2017). *CSS: The definitive guide: Visual presentation for the web* (4.ª ed.). O'Reilly Media.

Morales, A. (2023). Impacto de la utilización de un framework como Laravel en el desarrollo de un sitio web para servicios de modificaciones corporales. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7(3), 3220–3223. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6402

Porras Aguirre, J., Sosa Pintle, A. M., Martínez Ramírez, V., Martínez Rabanales, S., & Islas Vázquez, J. I. (2025). Modelo de desarrollo de soluciones escalables basado en arquitectura full stack y gestión híbrida. Revista IPSUMTEC, 8(2), 138–147. https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v8i2.425

Poulton, N. (2023). *Docker deep dive: 2023 edition*. Publishdrive.

Programa SENDA-UNAM. (2024). *Salud mental en estudiantes universitarios: el programa SENDA*. Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.orienta.unam.mx/senda/7/art5/

Sadalage, P. J., & Fowler, M. (2016, mayo). Evolutionary database design. *martinfowler.com*. https://martinfowler.com/articles/evodb.html

Sandoval-Acosta, J. A., Flores-Gutiérrez, X. P., Cota-Pardini, Y. B., Reyes-Zúñiga, C. G., & Alzate-Espinoza, J. H. (2024). Optimización del módulo de mejora del Sistema Integral de Gestión de una institución educativa rural mediante tecnologías web. Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social, 10(1). https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/10545753.pdfSpatie. (2025). Open Source Packages: Calendar Links & Opening Hours. Spatie Documentation. https://spatie.be/open-source

Schwaber, K., & Sutherland, J. (2020). La Guía de Scrum. Scrum.org. https://scrumguides.org/docs/scrumguide/v2020/2020-Scrum-Guide-Spanish-European.pdf

Sinha, S. (2019). Beginning Laravel: Build websites with Laravel 5.8 (2.ª ed.). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4991-8

Sommerville, I. (2011). Ingeniería del software (9.ª ed.). Pearson Educación. ISBN 978-607-32-0603-7

Spatie. (2025). Open source packages: Calendar Links & Opening Hours. Spatie Documentation. https://spatie.be/open-source

Spurlock, J. (2013). *Bootstrap: Responsive web development*. O'Reilly Media.

Stauffer, M. (2023). Laravel: Up & Running: A Framework for Building Modern PHP Apps (3.ª ed.). O'Reilly Media.

Taylor, M. E., Liu, M., Abelson, S., Eisenberg, D., Lipson, S. K., & Schueller, S. M. (2024). The reach, effectiveness, adoption, implementation, and maintenance of digital mental health interventions for college students: A systematic review. Current Psychiatry Reports, 26(12), 683–693. https://doi.org/10.1007/s11920-024-01545-w

Turnbull, J. (2014). *The Docker book: Containerization is the new virtualization*. James Turnbull.

Vincze, S., Bugán, A., Kósa, K., & Bács, Z. (2026). An integrated multilevel mental health support system for university students: 4-year longitudinal observational study. JMIR Formative Research, 10, e67089. https://doi.org/10.2196/67089

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización [Conceptualization]	M.T.I Francisco Eduardo Rodríguez Campos
2	Curación de datos [Data curation]	Dra. María Guadalupe Flores Luévanos, Dra. Karla Verónica Rodríguez Lozano
3	Análisis formal [Formal analysis]	Dra. Karla Verónica Rodríguez Lozano, M.T.I Francisco Eduardo Rodríguez Campos, Dra. María Guadalupe Flores Luévanos
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	M.I.I. José Armando García Bautista
5	Investigación [Investigation]	M.T.I Francisco Eduardo Rodríguez Campos, Dra. Karla Verónica Rodríguez Lozano, Herrera García José Carlos
6	Methodología [Methodology]	Dra. Karla Verónica Rodríguez Lozano, Dra. María Guadalupe Flores Luévanos
7	Administración del proyecto [Project administration]	M.T.I Francisco Eduardo Rodríguez Campos
8	Recursos [Resources]	M.I.I. José Armando García Bautista
9	Software [Software]	M.T.I Francisco Eduardo Rodríguez Campos, Herrera García José Carlos
10	Supervision [Supervision]	M.T.I Francisco Eduardo Rodríguez Campos
11	Validación [Validation]	Dra. Karla Verónica Rodríguez Lozano, Herrera García José Carlos
12	Visualización [Visualization]	Dra. Karla Verónica Rodríguez Lozano, M.T.I Francisco Eduardo Rodríguez Campos
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Dra. Karla Verónica Rodríguez Lozano
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Dra. Karla Verónica Rodríguez Lozano, Dra. María Guadalupe Flores Luévanos, M.I.I. José Armando García Bautista

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID045

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Google Earth Engine (GEE) como Herramienta de Procesamiento y Análisis de Datos del Satélite Sentinel-5P

Google Earth Engine (GEE) as a Tool for Processing and Analyzing Sentinel-5P Satellite Data

Servín-Prieto, A.J.[1]; Velásquez-Chávez, T.E.[2] ✉; Juárez-Hernández, J.M.[3]; Hernández-López, M.[4]; Vásquez-Corral, M.H.[5]

Datos de Adscripción:

[1] Servín Prieto, Alan Joel
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
alan.sp@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5534-7875

[2] ✉ Velásquez Chávez, Tania Elizabeth
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
tania.vc@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7788-1786

[3] Juárez Hernández, José María
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
jose.jh@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5790-651X

[4] Hernández López, Mónica
TecNM: Instituto Tecnológico de Torreón. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
monicahlop@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6249-127X

[5] Vásquez Corral, Marcial Humberto
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
marcial.vc@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0722-0369

Resumen **– El análisis de contaminantes atmosféricos mediante datos satelitales ha cobrado gran relevancia en los estudios ambientales actuales; sin embargo, el manejo y procesamiento de grandes volúmenes de información geoespacial continúa siendo un desafío. En este contexto, *Google Earth Engine* (GEE) se ha consolidado como una plataforma eficaz para el procesamiento de datos en la nube, basada en una arquitectura distribuida que permite el análisis de grandes colecciones de datos mediante programación en lenguaje Python, sin requerimientos de infraestructura computacional local de alto rendimiento. El objetivo de este estudio fue evaluar la aplicabilidad de GEE para el procesamiento y análisis de datos del satélite Sentinel-5P, el cual proporciona información global sobre contaminantes atmosféricos con su sensor TROPOMI. Se implementó un flujo de trabajo que incluyó la selección del área de estudio, filtrado temporal, procesamiento de imágenes y generación de composiciones temporales mediante scripts reproducibles. Los resultados muestran que GEE permite el manejo eficiente de grandes volúmenes de datos satelitales; el procesamiento de información correspondiente a cuatro años se completó en aproximadamente una semana, evidenciando una optimización significativa en los tiempos de análisis en comparación con métodos tradicionales basados en procesamiento local. Asimismo, la plataforma facilitó el análisis multitemporal y la generación de resultados reproducibles. Estos hallazgos evidencian el potencial de GEE como una herramienta confiable para el análisis de información atmosférica, contribuyendo al monitoreo ambiental y apoyando la toma de decisiones en materia de calidad del aire a diferentes escalas espaciales.**

Palabras Clave **– Calidad del Aire, *Google Earth Engine*, Procesamiento en la nube, Sentinel-5P, Teledetección.**

Abstract **- The analysis of atmospheric pollutants using satellite data has gained significant relevance in current environmental studies; however, the management and processing of large volumes of geospatial data remain a challenge. In this context, *Google Earth Engine* (GEE) has emerged as an effective cloud-based platform, built on a distributed architecture that enables the analysis of large datasets through Python-based programming, without requiring high-performance local computing infrastructure. The aim of this study was to evaluate the applicability of GEE for the processing and analysis of data from the Sentinel-5P, which provides global information on atmospheric pollutants through the TROPOMI sensor. A workflow was implemented including area of interest selection, temporal filtering, image processing, and the generation of temporal composites using reproducible scripts. The results show that GEE enables efficient handling of large volumes of satellite data; the processing of four years of information was completed in approximately one week, demonstrating a significant optimization in analysis time compared to traditional local processing methods. Additionally, the platform facilitated multitemporal analysis and the generation of reproducible results. These findings highlight the potential of GEE as a reliable tool for atmospheric data analysis, supporting environmental monitoring and decision-making related to air quality at different spatial scales.**

Keywords **– Air Quality, *Google Earth Engine*, Cloud-based processing, Remote Sensing, Sentinel-5P.**

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID047

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales problemas ambientales y de salud pública, no solo a nivel local o regional, sino también a nivel mundial, debido al incremento sostenido de las emisiones contaminantes derivadas de las actividades industriales, urbanas y agrícolas (*World Health Organization,* 2021). El crecimiento poblacional, la expansión urbana y el aumento del consumo energético han favorecido la liberación de gases y partículas contaminantes que alteran la composición natural de la atmósfera, lo que se traduce en impactos negativos en los ecosistemas, el clima y la salud humana (IPCC, 2021). Entre los efectos más relevantes asociados a la contaminación del aire se encuentran las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, la disminución de la calidad ambiental y la contribución significativa al cambio climático (UNEP, 2019).

Entre los contaminantes atmosféricos de mayor importancia se encuentra el monóxido de carbono (CO), un gas incoloro e inodoro producido principalmente por la combustión de combustibles fósiles y biomasa (EPA, 2022). Las principales fuentes de emisión de CO son el transporte vehicular, las actividades industriales, la quema de residuos agrícolas y forestales, así como diversos procesos relacionados con el uso de hidrocarburos (Seinfeld & Pandis, 2016). La exposición prolongada a concentraciones elevadas de CO representa un riesgo importante para la salud humana debido a su capacidad de reducir el transporte de oxígeno en la sangre, lo que afecta principalmente los sistemas respiratorio, cardiovascular y neurológico (EPA, 2022).

Recientemente, diversos estudios han resaltado la importancia de implementar herramientas tecnológicas, como la teledetección, para el monitoreo ambiental y el análisis de contaminantes atmosféricos, debido a su capacidad de proporcionar información continua y de alcance global. Los sensores remotos permiten obtener información espacial y temporal sobre la dispersión de contaminantes, facilitando el análisis de patrones de emisión, transporte y dispersión en la atmósfera (Griffin *et al.,* 2019). Dentro de estos sistemas de monitoreo, destaca el satélite Sentinel-5P, perteneciente al programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea, que incorpora el sensor TROPOMI (*Tropospheric Monitoring Instrument*), diseñado específicamente para el monitoreo de gases de traza y aerosoles atmosféricos con alta resolución espacial y temporal (Levelt *et al.,* 2018).

Los datos generados por este sensor han sido ampliamente utilizados para el análisis de contaminantes como dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2) y monóxido de carbono (CO), permitiendo identificar las tendencias temporales y áreas críticas de contaminación en diferentes regiones del planeta (Eskes *et al.,* 2022). Sin embargo, el procesamiento y análisis de grandes volúmenes de información satelital representan un desafío debido, principalmente, a los requerimientos de infraestructura computacional asociados al manejo de datos geoespaciales.

En este sentido, *Google Earth Engine* se ha consolidado como una de las plataformas de mayor importancia en el procesamiento de este tipo de información, ya que utiliza la infraestructura de la nube. Esta plataforma permite acceder, procesar y analizar colecciones de datos satelitales mediante algoritmos desarrollados en lenguajes de programación como Python y JavaScript, sin necesidad de infraestructura computacional local de alto rendimiento (Gorelick *et al.,* 2017). Entre sus ventajas destacan la automatización de procesos, el análisis multitemporal y la generación de resultados reproducibles en periodos de tiempo reducidos.

En regiones como la Comarca Lagunera donde la actividad agrícola e industrial son intensas, el monitoreo de emisión de contaminantes resulta de mucha importancia (INEGI, 2020). La región, además, presenta condiciones meteorológicas que propician la acumulación de estos gases, tales como baja velocidad del viento, temperaturas extremas y estabilidad atmosférica en algunas épocas del año (Jacob & Winner, 2009).

A pesar de la relevancia ambiental de esta problemática, los estudios que enfatizan el análisis espaciotemporal de gases como el CO mediante la percepción remota siguen siendo limitados. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la viabilidad de implementar *Google Earth Engine* como herramienta de procesamiento y análisis de datos del satélite Sentinel-5P. Asimismo, se busca demostrar la utilidad del procesamiento en la nube para optimizar el manejo de grandes volúmenes de información y contribuir al monitoreo ambiental y la toma de decisiones en materia de calidad del aire.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Google Earth Engine

El crecimiento exponencial de los datos satelitales ha generado la necesidad de utilizar plataformas capaces de almacenar, administrar y procesar grandes volúmenes de información geoespacial de manera eficiente. GEE se ha consolidado como una de las herramientas más importantes para el análisis geoespacial basado en la nube, debido a su capacidad de integrar colecciones masivas de datos provenientes de satélites, algoritmos de procesamiento y recursos computacionales distribuidos en un mismo entorno (Gorelick *et al.,* 2017).

Google Earth Engine es una plataforma desarrollada por Google que combina un catálogo multitemporal de imágenes de satélite con infraestructura de cómputo en la nube de alta capacidad y rendimiento (Figura 1). La plataforma permite ejecutar procesos complejos de análisis espacial sin requerir equipos locales de alto rendimiento, lo que representa una ventaja significativa frente a metodologías tradicionales basadas en procesamiento local.

Una de las principales fortalezas de GEE es su capacidad para consultar colecciones históricas de imágenes satelitales provenientes de distintas misiones espaciales, incluidas Landsat, MODIS, Sentinel, CHIRPS y ERA5, entre otras (Figura 2). Esta integración facilita el desarrollo de estudios ambientales multitemporales y multiescalares mediante procesos automatizados y de fácil replicación.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID047

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 1
Plataforma Google Earth Engine

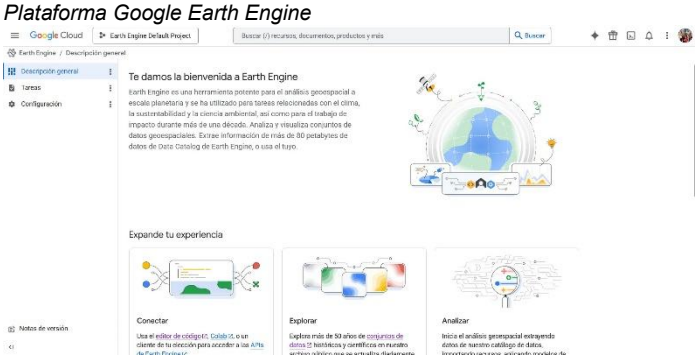


Figura 2
Catálogo de datos de la plataforma Google Earth Engine



En este estudio, la plataforma GEE fue utilizada como entorno principal para la obtención y procesamiento de datos satelitales de Sentinel-5P, permitiendo realizar análisis espacial y temporal de concentraciones de monóxido de carbono durante el periodo de 2019 a 2023.

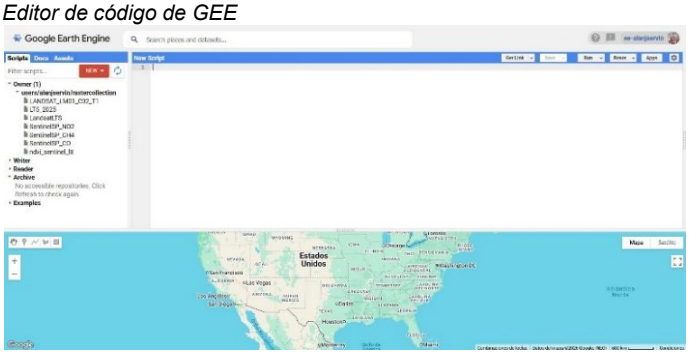
Figura 3
Colección de datos de la constelación Sentinel



2.2 Arquitectura y procesamiento en la nube

El funcionamiento de GEE se basa en una arquitectura distribuida que permite ejecutar procesos directamente en servidores remotos. A diferencia de los sistemas de información geográfica convencionales, donde los datos deben ser descargados y procesados de manera local, GEE realiza el procesamiento directamente en la nube, reduciendo significativamente el tiempo de ejecución y el consumo de recursos computacionales.
La plataforma utiliza procesamiento paralelo distribuido, lo que permite trabajar simultáneamente con miles de imágenes satelitales. Este enfoque resulta especialmente útil para estudios atmosféricos multitemporales en los que se requiere analizar una vasta colección de datos (Figura 4).

Figura 4
Editor de código de GEE



En esta investigación, el procesamiento de cuatro años de imágenes de Sentinel-5P se completó en cinco días, evidenciando una optimización respecto a metodologías tradicionales basadas en la descarga y el procesamiento local de las imágenes.
Por otro lado, la plataforma permitió automatizar tareas respectivas como: filtrado temporal de imágenes, aplicación de filtros de calidad, cálculo de promedios espaciales y temporales, generación de composiciones ráster y exportación automatizada de los resultados.
Esta automatización redujo, además, los errores humanos asociados al procesamiento manual y facilitó la reproducibilidad metodológica.

2.3 Obtención y preparación de datos satelitales

Para el análisis atmosférico se empleó la colección satelital Sentinel-5P OFFL L3 CO disponible en el catálogo de GEE. Esta colección contiene información sobre la densidad columnar de monóxido de carbono obtenida mediante el sensor TROPOMI. El procedimiento de preparación de datos se muestra en la Figura 5.

Figura 5
Metodología aplicada en la preparación de datos

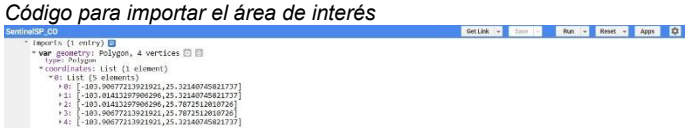


Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID047

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La delimitación espacial se realizó mediante un archivo vectorial de la Comarca Lagunera, que se importó a GEE para definir el área de interés (ROI, Region of Interest) (Figura 6).

Figura 6
Código para importar el área de interés



Posteriormente, se aplicaron filtros temporales mediante funciones internas de GEE para seleccionar únicamente las imágenes comprendidas en el periodo de interés.
El siguiente fragmento de código ilustra el proceso de filtrado de imágenes (véase la Figura 7).

Figura 7
Código para realiza el filtrado temporal

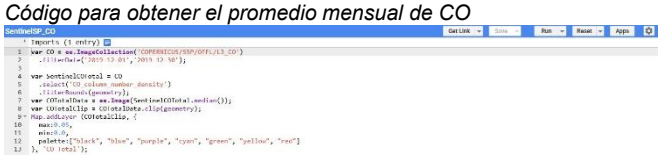


La capacidad de GEE para acceder directamente a los repositorios satelitales evitó la descarga manual de cientos de archivos y simplificó considerablemente el flujo de trabajo.

2.4 Procesamiento multitemporal de imágenes

Una de las principales ventajas de trabajar con GEE es la facilidad para realizar análisis multitemporales mediante funciones integradas de reducción estadística.
En este estudio se calcularon promedios mensuales de concentración de CO mediante operaciones de reducción temporal aplicadas a la colección satelital (Figura 8).

Figura 8
Código para obtener el promedio mensual de CO



El cálculo del promedio temporal se realizó mediante la función *.mean()* disponible en GEE.
La expresión matemática utilizada fue la siguiente:

$$CO_{prom} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} CO_i \qquad (1)$$

Donde:

- CO_{prom} representa la concentración promedio de CO.
- CO_i corresponde a cada imagen de la colección.
- n representa el número total de imágenes utilizadas.

El uso de operaciones de reducción permitió sintetizar grandes volúmenes de información en productos cartográficos representativos de la dispersión temporal del contaminante.

2.5 Aplicación de filtros de calidad

Los productos satelitales atmosféricos pueden verse afectados por factores como la nubosidad, los aerosoles y los errores instrumentales. Por ello, se aplicaron filtros de calidad utilizando las bandas QA (*Quality Assurance*) incluidas en los productos de Sentinel-5P.
La aplicación de filtros permite eliminar píxeles de baja confiabilidad antes de realizar los análisis estadísticos y espaciales.
La capacidad de procesamiento paralelo de GEE permitió aplicar estos filtros automáticamente a toda la colección satelital sin afectar significativamente el tiempo de procesamiento.

2.6 Generación de mapas temáticos

Posteriormente se generaron mapas temáticos de concentración de CO mediante visualización raster utilizando escalas de color para representar la variabilidad espacial del contaminante.
Los productos generados permitieron identificar zonas urbanas, industriales y agrícolas con mayores concentraciones de contaminación.
La visualización en GEE facilitó la exploración interactiva de resultados, la comparación temporal entre mes y mes, así como entre año y año, la identificación rápida de patrones espaciales y, finalmente, la exportación de mapas georreferenciados (Figura 9).

Además, GEE permite exportar los resultados en formato GeoTIFF para su posterior integración en Sistemas de Información Geográfica.

Figura 9
Obtención de mapas temáticos de CO



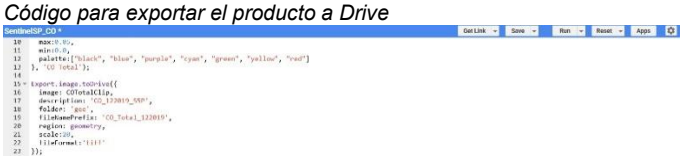
2.7 Exportación y automatización de resultados

La automatización constituyó uno de los aspectos más relevantes de este estudio. Mediante scripts reproducibles, fue posible ejecutar procedimientos de análisis completos sin intervención manual constante.
Los resultados fueron exportados automáticamente mediante funciones integradas en GEE a Drive (Figura 10).
Esta automatización permitió generar productos cartográficos y bases de datos listas para el análisis estadístico complementario.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID047

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 10
Código para exportar el producto a Drive



2.8 Ventajas de GEE en estudios atmosféricos

Los mapas temáticos permiten identificar las ventajas de *Google Earth Engine* en los estudios de dispersión de contaminantes. Entre las ventajas más destacables están:

1. Procesamiento de grandes volúmenes de datos en tiempo reducido.
2. Acceso inmediato a colecciones satelitales históricas.
3. Automatización de flujos metodológicos.
4. Reproducibilidad de resultados.
5. Integración con el lenguaje de programación Python.
6. Reducción de los requerimientos de infraestructura local.
7. Facilidad para desarrollar análisis multitemporal.

Estas características convierten a GEE en una herramienta altamente eficiente para investigaciones ambientales relacionadas con el monitoreo de contaminantes atmosféricos, el cambio climático y el análisis espacial de contaminantes.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Procesamiento y manejo de información satelital

Uno de los principales resultados obtenidos fue la capacidad de GEE para procesar grandes volúmenes de información proveniente de satélites en tiempos significativamente acortados. Durante esta investigación se analizaron las imágenes correspondientes al periodo de 2019 a 2023 utilizando funciones de automatización para el filtrado, la calidad y la exportación de datos.

El procesamiento multitemporal realizado en GEE permitió completar el análisis de cuatro años de información en cinco días, lo que representó una ventaja considerable respecto a metodologías convencionales basadas en la descarga y el procesamiento de imágenes de manera local. Este resultado se asemeja al reportado por Gorelick et al. (2017), quienes destacan que la arquitectura distribuida de GEE permite optimizar procesos geoespaciales a gran escala mediante la computación paralela.

Asimismo, la plataforma eliminó la necesidad de descargar cada imagen de satélite por separado, reduciendo el consumo de almacenamiento local y simplificando el flujo metodológico de trabajo. Esto resultó particularmente importante considerando el tamaño y la frecuencia de los productos generados por el Sentinel-5P.

3.2 Eficiencia de GEE en estudios atmosféricos

El aporte más relevante del presente estudio fue demostrar la eficiencia operativa de GEE para investigaciones de contaminación atmosférica en un espacio de tiempo determinado, entre las principales ventajas identificadas durante el estudio destacan; el acceso inmediato a datos satelitales históricos, el procesamiento en la nube, la automatización de análisis, la reducción significativa de tiempos en procesamiento, la replicabilidad de la metodología y la integración de lenguajes de programación como Python para el desarrollo de algoritmos personalizados.

La automatización permitió aplicar filtros de calidad, generar composiciones temporales y exportar los productos cartográficos mediante scripts, lo que redujo los errores asociados a los procesos manuales.

Por otro lado, la plataforma de GEE facilitó la integración de análisis basados en técnicas de percepción remota, fortaleciendo la capacidad de monitoreo ambiental a gran escala.

3.3 Distribución espacial del CO

El análisis evidenció una distribución heterogénea de las concentraciones de CO en la Comarca Lagunera. Las mayores concentraciones se localizaron principalmente en las zonas urbanas con alta densidad vehicular, en las áreas industriales de las ciudades y en las áreas con alta actividad agrícola asociadas principalmente a la quema de residuos, así como en sectores en la periferia de las manchas urbanas con intensa actividad antropogénica.

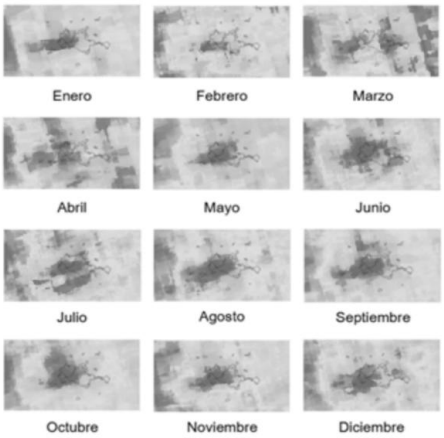
Los mapas temáticos generados mostraron patrones espaciales consistentes durante el periodo analizado, con concentraciones más elevadas en municipios con mayor desarrollo urbano e industrial.

Estos resultados coinciden con estudios previos que señalan que el transporte vehicular, las actividades industriales y la quema de biomasa representan la principal fuente de emisiones de CO en regiones semiáridas y en zonas con alta actividad agrícola (Zhang *et al.,* 2019; Yokelson *et al.,* 2008).

La capacidad de visualización de datos de GEE permitió identificar rápidamente zonas críticas de contaminación mediante mapas ráster de alta resolución. La automatización de la generación de composiciones espaciales facilitó, además, la comparación mensual del comportamiento del contaminante.

Las figuras 11, 12, 13, 14 y 15 muestran la dispersión del CO con promedios mensuales, en las que las tonalidades más oscuras representan los sitios con mayor concentración del contaminante.

Figura 11
Dispersión del CO en la Comarca Lagunera durante el 2019



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID047

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 12
Dispersión del CO en la Comarca Lagunera durante el 2020

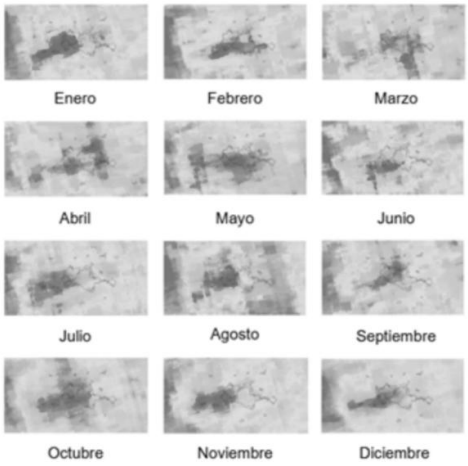


Figura 13
Dispersión del CO en la Comarca Lagunera durante el 2021

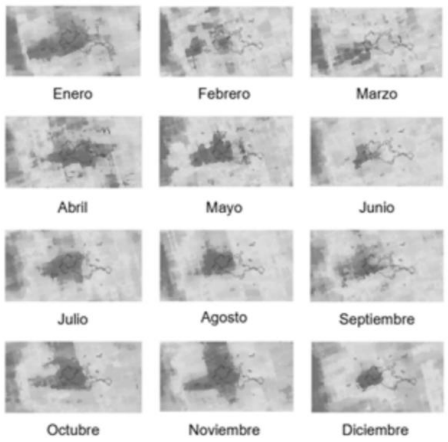


Figura 14
Dispersión del CO en la Comarca Lagunera durante el 2022

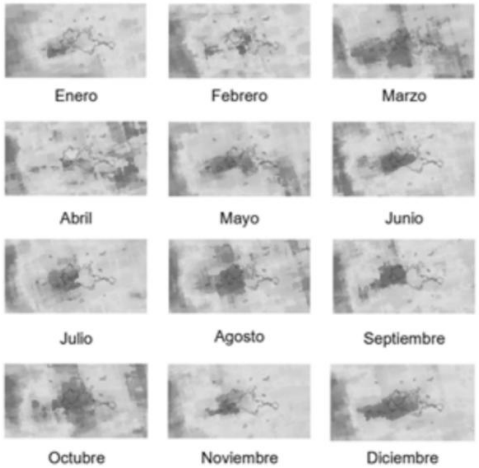
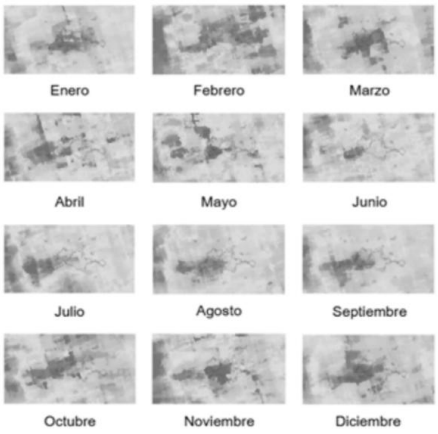


Figura 15
Dispersión del CO en la Comarca Lagunera durante el 2023



3.4 Implicaciones ambientales y tecnológicas

Los resultados obtenidos evidencian el potencial de GEE como herramienta estratégica para el monitoreo ambiental en regiones con infraestructura limitada para el monitoreo de la calidad del aire.

El uso combinado de esta plataforma de procesamiento en la nube y de la información obtenida mediante sensores remotos, como el satélite Sentinel-5P, representa una alternativa eficiente para la vigilancia ambiental, la identificación de zonas críticas de contaminación, el análisis multitemporal de la dispersión de contaminantes, el apoyo a políticas públicas ambientales y también el desarrollo de sistemas de monitoreo eficientes.

Además, la disponibilidad gratuita de los datos de Sentinel-5P y de herramientas como GEE facilita el desarrollo de proyectos de investigación científica y de aplicaciones ambientales en países en desarrollo, contribuyendo al fortalecimiento de las capacidades tecnológicas para el monitoreo de la calidad del aire.

3.5 Limitaciones del estudio

A pesar de los resultados obtenidos, es importante considerar algunas limitaciones asociadas al uso de datos satelitales. La resolución espacial de los productos de Sentinel-5P puede limitar la identificación detallada de fuentes puntuales de contaminación a escala urbana. Asimismo, es importante señalar que se depende completamente de factores climáticos, como la nubosidad y los aerosoles, así como de errores instrumentales que pueden introducir incertidumbre en las estimaciones de la concentración de CO.

Por otra parte, aunque *Google Earth Engine* cuenta con gran capacidad de procesamiento, algunas operaciones complejas pueden verse comprometidas por restricciones computacionales internas de la plataforma, en particular al trabajar con series temporales extensas y múltiples variables simultáneamente.

Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda complementar futuras investigaciones con datos técnicamente sustentados, como, por ejemplo, la validación con información meteorológica de la región, contar con estaciones terrestres de monitoreo, obtener modelos de dispersión atmosférica y trabajar con técnicas de validación estadística.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID047

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Con lo anterior, estas herramientas permitirán fortalecer la precisión y la validación de los resultados obtenidos mediante técnicas de percepción remota.

IV. CONCLUSIONES

La realización de este estudio demostró la aplicabilidad de *Google Earth Engine* para el procesamiento y análisis de datos obtenidos mediante sensores remotos, con enfoque en el monitoreo de variables atmosféricas a gran escala, como el Sentinel-5P.

Los resultados presentados evidencian que la plataforma permite el manejo de manera eficiente de grandes volúmenes de información mediante su procesamiento en la nube sin comprometer la infraestructura local del usuario, además, optimiza de manera significativa los tiempos de análisis y facilita la automatización de procedimientos mediante scripts que pueden ser reproducibles.

El análisis realizado en la Comarca Lagunera, en el período 2019-2023, permitió identificar zonas y períodos con mayores concentraciones de CO, asociadas principalmente a actividades humanas, industriales y agrícolas. También se puede concluir una influencia importante de las condiciones meteorológicas sobre la acumulación del contaminante.

El uso combinado de los datos de Sentinel-5P y GEE representa una alternativa confiable y eficiente para el monitoreo atmosférico de la región, especialmente cuando la infraestructura de monitoreo terrestre es limitada.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México y al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, así como al Instituto Tecnológico de Torreón por el apoyo académico y técnico brindado para el desarrollo de esta investigación.

También reconocemos a la Agencia Espacial Europea (ESA) y a la plataforma *Google Earth Engine* por proporcionar acceso libre a los datos de satélite y a las herramientas de procesamiento utilizadas para la realización de este estudio.

VI. REFERENCIAS

Caselli, M. (2020). *Air pollution and climate change*. Springer.

Environmental Protection Agency. (2022). *Carbon monoxide's impact on indoor air quality* [Página web]. United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/carbon-monoxides-impact-indoor-air-quality

Eskes, H., van Geffen, J., Sneep, M. y Apituley, A. (2022). *Sentinel-5P TROPOMI carbon monoxide level 2 product user manual* [Archivo PDF]. European Space Agency. https://sentinels.copernicus.eu

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. y 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

Griffin, D., McLinden, C. A., Racine, J., Moran, M. D., Zhao, X., Pavlovic, R., … Eskes, H. (2019). High-resolution mapping of carbon monoxide with TROPOMI: First results and applications. *Atmospheric Measurement Techniques, 12*(10), 5507–5518. https://doi.org/10.5194/amt-12-5507-2019

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Censo de población y vivienda 2020* [Página web]. INEGI. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.

Jacob, D. J. y Winner, D. A. (2009). Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment, 43*(1), 51–63. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051

Levelt, P. F., van den Oord, G. H. J., Dobber, M. R., Mälkki, A., Visser, H., de Vries, J., … Veefkind, J. P. (2018). The Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI). *Atmospheric Measurement Techniques, 11*(1), 21–45. https://doi.org/10.5194/amt-11-21-2018

Seinfeld, J. H. y Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3.ª ed.). Wiley.

United Nations Environment Programme. (2019). *Air pollution in Asia and the Pacific: Science-based solutions*. United Nations Environment Programme.

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines* [Página web]. World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

Yokelson, R. J., Crounse, J. D., DeCarlo, P. F., Karl, T., Urbanski, S., Atlas, E., … Wennberg, P. O. (2008). Emissions from biomass burning in Mexico. *Atmospheric Chemistry and Physics, 8*(13), 3509–3527. https://doi.org/10.5194/acp-8-3509-2008

Zhang, Y., Bocquet, M., Mallet, V., Seigneur, C. y Baklanov, A. (2015). Real-time air quality forecasting, part I: History, techniques, and current status. *Atmospheric Environment, 60*, 632–655. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.031

Zhang, Z., Streets, D. G., Carmichael, G. R., He, K. y Huo, H. (2019). Satellite observations of carbon monoxide emissions and transport. *Remote Sensing of Environment, 232*, 111301. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111301

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización [Conceptualization]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández
2	Curación de datos [Data curation]	Alan Joel Servín Prieto, Tania Elizabeth Velásquez Chávez
3	Análisis formal [Formal analysis]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Alan Joel Servín Prieto
5	Investigación [Investigation]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández, Tania Elizabeth Velásquez Chávez, Mónica Hernández López y Marcial Humberto Vasquez Corral
6	Methodología [Methodology]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández
7	Administración del proyecto [Project administration]	Alan Joel Servín Prieto
8	Recursos [Resources]	Alan Joel Servín Prieto
9	Software [Software]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández
10	Supervision [Supervision]	Tania Elizabeth Velasquez Chavez, Mónica Hernández López
11	Validación [Validation]	Tania Elizabeth Velasquez Chavez, Mónica Hernández López
12	Visualización [Visualization]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Alan Joel Servín Prieto
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández, Tania Elizabeth Velásquez Chávez, Mónica Hernández López y Marcial Humberto Vásquez Corral

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID047

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Análisis Comparativo Sentinel-2 vs Sequoia en la Estimación de ETc Basada en NDVI

Comparative Analysis of Sentinel-2 vs Sequoia in NDVI-Based ETc Estimation

Servín-Prieto, A.J.[1]; Juárez-Hernández, J.M.[2] ✉; Hernández-López, M.[3]; Velásquez-Chávez, T.E.[4]; Adame-Delgado, R.[5]

Datos de Adscripción:

[1] Servín Prieto, Alan Joel
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
alan.sp@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5534-7875

[2] ✉ Juárez Hernández, José María
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
jose.jh@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5790-651X

[3] Hernández López, Mónica
TecNM: Instituto Tecnológico de Torreón. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
monicahlop@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6249-127X

[4] Velásquez Chávez, Tania Elizabeth
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
tania.vc@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7788-1786

[5] Adame Delgado, Raymundo
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
raymundo.ad@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9248-6376

Resumen.– **La estimación precisa de la evapotranspiración del cultivo (ETc) es fundamental para el manejo eficiente del agua en la agricultura. En este estudio se evaluó la relación entre el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la ETc mediante el método de dos pasos, utilizando datos de sensores satelitales y de vehículo aéreo no tripulado (UAV). Se emplearon imágenes del satélite Sentinel-2 y un sensor multiespectral Parrot Sequoia, además de datos de evapotranspiración de referencia (ET_0) obtenidos de una estación meteorológica localizada en el sitio de estudio. El NDVI se transformó a coeficiente de cultivo (Kc) mediante una relación lineal, y posteriormente se estimó la ETc. Los resultados mostraron que el NDVI derivado del sensor UAV fue consistentemente mayor que el obtenido de Sentinel-2, con diferencias promedio entre 15% y 30%, lo que se reflejó en valores superiores de Kc y ETc, alcanzando diferencias de hasta 1.5 mm día^{-1}. Asimismo, se observó una correlación moderada entre ambas fuentes de datos (r = 0.9398), lo que indica una concordancia general en la detección del vigor del cultivo, aunque con un sesgo sistemático atribuible a la resolución espacial y a la heterogeneidad del dosel vegetal. Se concluye que el uso de sensores UAV permite una mejor representación de la variabilidad espacial del cultivo, lo que impacta significativamente en la estimación de la evapotranspiración. Estos resultados destacan la importancia de la resolución espacial en aplicaciones de agricultura de precisión y manejo hídrico.**

Palabras Clave **– Agricultura de precisión, Evapotranspiración, NDVI, Sentinel-2, Sequoia**

Abstract **- Accurate estimation of crop evapotranspiration (ETc) is essential for efficient water management in agriculture. This study evaluated the relationship between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and ETc using the two-step method, integrating data from satellite and unmanned aerial vehicle (UAV) sensors. Imagery from Sentinel-2 and a multispectral Parrot Sequoia sensor were used, along with reference evapotranspiration (ET_0) obtained from a meteorological station located at the study site. NDVI values were transformed into crop coefficient (Kc) using a linear relationship, and ETc was subsequently estimated. Results showed that NDVI derived from the UAV sensor was consistently higher than that obtained from Sentinel-2, with average differences ranging from 15% to 30%. These differences resulted in higher Kc and ETc values, with deviations of up to 1.5 mm day^{-1}. A moderate correlation was observed between both data sources (r = 0.61), indicating general agreement in crop vigor detection, although a systematic bias associated with spatial resolution and canopy heterogeneity was identified. It is concluded that UAV-based sensors provide a more detailed representation of crop spatial variability, significantly influencing evapotranspiration estimates. These findings highlight the importance of spatial resolution in precision agriculture and water management applications.**

Keywords **– Precision agriculture, Evapotranspiration, NDVI, Sentinel-2, Sequoia**

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID048

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

I. INTRODUCCIÓN

La actividad agrícola es uno de los sectores con mayor demanda de agua a nivel mundial, por lo que el manejo eficiente de este recurso se ha convertido en una prioridad para garantizar la sostenibilidad de los sistemas productivos. En este sentido, la estimación precisa de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) resulta fundamental, ya que permite conocer las necesidades hídricas reales de los cultivos y optimizar las estrategias de riego (Allen *et al.,* 1998).

Tradicionalmente, la evapotranspiración se ha estimado mediante métodos basados en información meteorológica y en coeficientes de cultivo (Kc), conocidos como métodos directos. Uno de los enfoques más utilizados en la actualidad es el método de dos pasos propuesto por la FAO, el cual estima la ET_c a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_0) y el coeficiente de cultivo mediante la relación:

$$ET_c = Kc \times ET_0 \quad (1)$$

Sin embargo, la determinación del coeficiente de cultivo mediante técnicas convencionales suele presentar limitaciones debido a la variabilidad espacial y temporal en el desarrollo del cultivo. Ante esta situación, la percepción remota ha surgido como una herramienta eficiente para estimar variables biofísicas asociadas al estado del cultivo (Jensen, 2015).

Entre los índices espectrales más utilizados destaca el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), que permite evaluar el vigor y la cobertura vegetal a partir de los valores de reflectancia registrados en las bandas espectrales del rojo y del infrarrojo cercano (Rouse *et al.,* 1974). Diversos estudios han demostrado la existencia de relaciones lineales entre el NDVI y el coeficiente de cultivo, lo que permite estimar la evapotranspiración a partir de información satelital y de sensores remotos (Glenn *et al.,* 2008).

Actualmente, plataformas satelitales como Sentinel-2 proporcionan imágenes multiespectrales de acceso libre con una resolución espacial y temporal adecuada para aplicaciones agrícolas. Asimismo, el uso de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) equipados con sensores multiespectrales ha permitido obtener información de muy alta resolución espacial, lo que facilita el análisis detallado de la variabilidad del cultivo (Zhang & Kovacs, 2012).

A pesar de las ventajas que ofrecen ambas tecnologías, existen diferencias importantes en la resolución espacial, la escala de análisis y la capacidad de detectar la heterogeneidad del dosel vegetal, que pueden influir significativamente en la estimación del NDVI y, en consecuencia, en los valores de Kc y ETc.

Por ello, el objetivo de este estudio consistió en evaluar la relación entre el NDVI y la evapotranspiración del cultivo mediante un método de dos pasos, utilizando información obtenida a partir de imágenes de Sentinel-2 y de un sensor multiespectral de un UAV Parrot Sequoia. Asimismo, se buscó comparar ambas fuentes de información y analizar el impacto de la resolución espacial en la estimación de la evapotranspiración en aplicaciones de agricultura de precisión.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la Granja Palestina, una unidad de producción agrícola-pecuaria ubicada en el municipio de Francisco I. Madero, en el estado de Coahuila, México. El sitio de estudio se ubica geográficamente en las coordenadas 25°46’53.2” de latitud norte y 103°18’28” de longitud oeste, a una altitud aproximada de 1,109 msnm (Figura 1).

Figura 1
Localización del predio Granja Palestina



El predio cuenta con una superficie total de 52.6 ha y se caracteriza por la realización de actividades agrícolas y pecuarias propias de la región semiárida del norte de México. Las condiciones climáticas predominantes en la zona favorecen el desarrollo de la agricultura bajo riego, por lo que el manejo eficiente del recurso hídrico es fundamental para la productividad agrícola (INEGI, 2020).

En el área de estudio se realizaron mediciones y se adquirió información espectral mediante sensores remotos de satélites y de vehículos aéreos no tripulados. El sitio contó con una estación meteorológica automática, utilizada para obtener las variables climáticas necesarias para calcular la evapotranspiración de referencia (ET0).

Las campañas de adquisición de datos se realizaron en diferentes etapas fenológicas del cultivo, con el propósito de evaluar el comportamiento temporal del NDVI y su relación con la evapotranspiración del cultivo.

2.2 Adquisición de imágenes Sentinel-2

Para el análisis satelital se emplearon imágenes multiespectrales del satélite Sentinel-2 perteneciente al programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). Sentinel-2 proporciona imágenes con resolución espacial de 10 m, 20 m y 60 m, así como una resolución temporal de aproximadamente cinco días, lo que permite desarrollar aplicaciones agrícolas y ambientales de alta precisión (Drush *et al.,* 2012).

Las imágenes utilizadas corresponden a las mismas fechas en que se realizaron las campañas de vuelo con el UAV, con el objetivo de reducir la diferencia temporal entre ambas fuentes de información.

Las bandas espectrales empleadas para el cálculo del NDVI fueron las que se muestran en la Tabla 1.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID048

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Tabla 1
Bandas espectrales del satélite Sentinel-2

Banda espectral	Longitud de onda (µm)
Red (Banda 4)	665 nm
NIR (Banda 8)	842 nm

Las imágenes fueron obtenidas a través de la plataforma Data Access Hubs del servicio Copernicus. Se aplicaron filtros de nubosidad para seleccionar únicamente las imágenes con baja cobertura de nubes en el área de estudio.
Posteriormente, las imágenes fueron recortadas con el polígono delimitado de la Granja Palestina, limitando el análisis únicamente a la superficie agrícola de interés.

2.3 Adquisición de imágenes UAV con sensor Parrot Sequoia

Con el propósito de comparar la respuesta espectral obtenida mediante sensores satelitales y de proximidad, se realizaron vuelos con un UAV equipado con el sensor multiespectral Parrot Sequoia.
El sensor Parrot Sequoia cuenta con cuatro bandas espectrales, como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2
Bandas espectrales del sensor Parrot Sequoia

Banda espectral	Longitud de onda (µm)
Green	550 nm
Red	660 nm
Red Edge	735 nm
NIR Near	790 nm

Además, el UAV incorpora un sensor RGB convencional y un sensor de irradiancia solar, lo que permite mejorar la calibración radiométrica de las imágenes.
Los vuelos se realizaron a una altura aproximada de 120 m sobre el nivel del terreno, con una resolución espacial de 18 cm, superior a la de Sentinel-2. Las misiones de vuelo fueron planificadas utilizando trayectorias automáticas con traslape longitudinal del 70% y transversal del 60%, lo que garantiza la cobertura total del predio y una adecuada reconstrucción fotogramétrica.
Las imágenes obtenidas fueron procesadas con el software Pix4D, especializado en la generación de orto mosaicos multiespectrales georreferenciados. Posteriormente, se realizaron procesos de calibración radiométrica utilizando paneles de reflectancia y el sensor de luz incidente.

2.4 Cálculo de Índice de Vegetación NDVI

El NDVI se utilizó como indicador del vigor y de la cobertura vegetal del cultivo.
El cálculo del NDVI se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad (2)$$

Donde:

- NIR representa la reflectancia en el infrarrojo.
- Red representa la reflectancia en la banda roja.

Los valores del NDVI varían entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 indican vegetación vigorosa y sana, así como una alta actividad fotosintética (Rouse *et al.,* 1974).
El cálculo fue realizado tanto para las imágenes de Sentinel-2 como para los orto mosaicos generados con el sensor Parrot Sequoia. Posteriormente, se generaron mapas de la distribución espacial del NDVI para analizar la variabilidad del cultivo en el sitio de estudio.

2.5 Obtención de la Evapotranspiración de Referencia (ET0)

La ET0 se obtuvo a partir de datos meteorológicos registrados por una estación climatológica automática de la marca DAVIS instalada en la Granja Palestina. La estación permitió el monitoreo continuo de variables climáticas necesarias para el cálculo de la evapotranspiración de referencia.
Las variables climáticas consideradas fueron: la temperatura máxima y mínima, la humedad relativa, la velocidad del viento, la radiación solar y la precipitación, entre otras.
El cálculo de ET0 se realizó mediante el método Penman-Monteith de la FAO-56, considerado el estándar internacional para la estimación de la evapotranspiración (Allen *et al.,* 1998).

$$ET_0 = \frac{\left[0.408\Delta(Rn-G)+\gamma\left(\frac{900}{T+273}\right)u_2(es-ea)\right]}{[\Delta+\gamma(1+0.34u_2)]} \quad (3)$$

Donde:

- ET0 corresponde a la evapotranspiración de referencia.
- Rn representa la radiación neta.
- G el flujo de calor en el suelo.
- T corresponde a la temperatura media del aire.
- U2 representa la velocidad del viento.
- es-ea corresponde al déficit de presión de vapor.
- A es la pendiente de la curva de presión de vapor.
- Y corresponde a la constante psicrométrica.

Los datos meteorológicos fueron procesados diariamente y posteriormente integrados con la información espectral obtenida por los sensores. Antes de realizar los análisis estadísticos y espaciales.

2.6 Relación NDVI - Kc

Con el propósito de estimar la evapotranspiración del cultivo, los valores de NDVI se transformaron en el coeficiente de cultivo Kc mediante una relación reportada por Calera *et al.,* 2018.

$$Kc = 1.25(NDVI) - 0.2 \quad (4)$$

Esta relación permite estimar dinámicamente el coeficiente de cultivo a partir del vigor vegetativo observado mediante sensores remotos (Gleen *et al.,* 2008).
Posteriormente, el cálculo de la evapotranspiración del cultivo se realizó por el método de dos pasos:

$$ETc = Kc \times ET0 \quad (5)$$

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID048

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Donde:

- ETc corresponde a la evapotranspiración del cultivo.
- Kc representa el coeficiente de cultivo.
- ET0 corresponde a la evapotranspiración de referencia.

Este procedimiento se aplicó tanto a los valores de NDVI obtenidos con Sentinel-2 como a los derivados del sensor Parrot Sequoia.

2.7 Procesamiento y análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron organizados y procesados con Excel® y Statgraphics®.

Se realizaron análisis comparativos entre:

- NDVI Sentinel-2 vs. NDVI UAV
- Kc Sentinel-2 vs. Kc UAV
- ETc Sentinel-2 vs. ETc UAV

Asimismo, se aplicaron análisis de correlación lineal para evaluar el grado de asociación entre ambas fuentes de información.
El coeficiente de correlación de Pearson se calculó mediante la expresión:

$$r = \frac{\sum[(xi - \bar{x})(yi - \bar{y})]}{\sqrt{[\sum(xi - \bar{x})^2 \ \sum(yi - \bar{y})^2]}} \quad (6)$$

Además, se analizaron las diferencias porcentuales y los errores promedio entre los valores estimados obtenidos a partir de ambas fuentes de información.

2.8 Generación de mapas temáticos

Finalmente, se generaron mapas temáticos de NDVI, Kc y ETc para visualizar la distribución espacial del cultivo en el área de estudio.
Los productos cartográficos permiten identificar zonas de diferente vigor vegetativo y variabilidad hídrica, facilitando el análisis espacial del comportamiento del cultivo.
La alta resolución espacial obtenida con UAV permitió detectar patrones de variabilidad no identificables en las imágenes de Sentinel-2.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis descriptivo de los valores de NDVI

A partir de la base de datos integrada por un total de 95 observaciones en dos periodos de tiempo, 2020 y 2021, se compararon los valores de NDVI obtenidos con los sensores Sentinel-2 y Parrot Sequoia. Los resultados mostraron que el NDVI obtenido con el Parrot Sequoia presentó valores promedio superiores a los estimados a partir de Sentinel-2.
El NDVI de Sentinel-2 presentó una media de 0.596, con valores mínimos y máximos de 0.181 y 0.877, respectivamente. Por su parte, el NDVI de Sequoia mostró una media de 0.714, con valores entre 0.147 y 0.887. Esta diferencia indica que el sensor del UAV registró una mayor respuesta espectral asociada al vigor vegetal del cultivo (Tabla 3).

Tabla 3
Estadística descriptiva de NDVI, Kc y ETc

Variable	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
NDVI Sentinel-2	0.596	0.162	0.181	0.877
NDVI Sequoia	0.714	0.176	0.147	0.887
Kc Sentinel-2	0.545	0.202	0.027	0.897
Kc Sequoia	0.692	0.220	-0.016	0.909
ETc Sentinel-2	0.354	0.140	0.018	0.627
ETc Sequoia	0.448	0.146	-0.008	0.639

La diferencia promedio entre ambos sensores fue de 0.118 unidades de NDVI, siendo mayor la obtenida con Sequoia. Esta diferencia representa un incremento aproximado del 19,7% respecto al NDVI promedio estimado a partir de Sentinel-2. Lo anterior puede explicarse por la mayor resolución espacial del sensor Parrot Sequoia, que permitió detectar con mayor detalle la variabilidad del dosel vegetal y reducir el efecto de la suciedad espectral entre la vegetación, el suelo desnudo y las sombras.

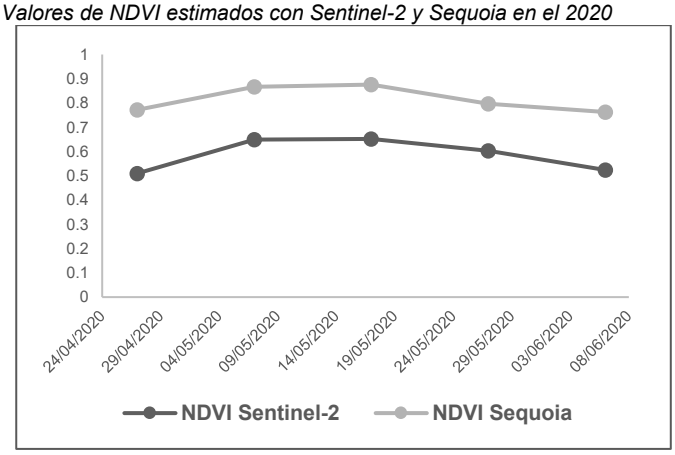
3.2 Comparación temporal Sentinel-2 y Parrot Sequoia

El análisis por fecha permitió observar que las mayores diferencias entre los sensores se registraron durante el ciclo 2020, principalmente en las fechas del 27 de abril, 7 de mayo, 17 de mayo y 6 de junio. En estas fechas, el NDVI de Sequoia fue considerablemente superior al de Sentinel-2 (Tabla 4).

Tabla 4
Promedios de NDVI y ETc en el ciclo 2020

Fecha	n	NDVI Sentinel-2	NDVI Sequoia	ETc Sentinel-2	ETc Sequoia	Dif. ETc
27/04/2020	6	0.510	0.772	0.267	0.467	0.200
07/05/2020	4	0.649	0.867	0.403	0.583	0.180
17/05/2020	3	0.652	0.876	0.375	0.546	0.171
27/05/2020	6	0.603	0.797	0.310	0.446	0.135
06/06/2020	5	0.524	0.763	0.301	0.497	0.196

Figura 2
Valores de NDVI estimados con Sentinel-2 y Sequoia en el 2020



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID048

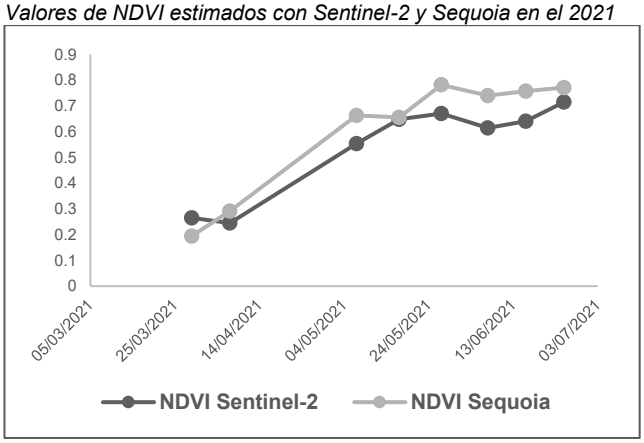
This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

En lo que respecta al ciclo 2021, las diferencias entre sensores fueron más variables. En algunas fechas como el 17 de mayo, los valores promedio fueron muy similares, mientras que, en otras fechas, como el 7 de junio y el 16 de junio, el sensor Parrot Sequoia volvió a presentar valores superiores (Tabla 5). Esto sugiere que la relación entre ambos sensores puede verse influida por la etapa fenológica del cultivo, la cobertura vegetal, la homogeneidad de la parcela y las condiciones de adquisición de las imágenes.

Tabla 5
Promedios de NDVI y ETc en el ciclo 2021

Fecha	n	NDVI Sentinel -2	NDVI Sequoia	ETc Sentinel-2	ETc Sequoia	Dif. ETc
29/03/2021	3	0.266	0.195	0.068	0.022	0.045
07/04/2021	4	0.245	0.291	0.074	0.113	0.039
07/05/2021	12	0.554	0.663	0.310	0.396	0.086
17/05/2021	9	0.648	0.656	0.384	0.391	0.007
27/05/2021	12	0.671	0.782	0.390	0.474	0.084
07/06/2021	9	0.615	0.740	0.376	0.479	0.103
16/06/2021	11	0.641	0.758	0.445	0.553	0.108
25/06/2021	11	0.715	0.772	0.479	0.528	0.049

Figura 3
Valores de NDVI estimados con Sentinel-2 y Sequoia en el 2021



Diversos estudios recientes han demostrado que los sensores de UAV permiten obtener información espectral con mayor detalle espacial que las plataformas satelitales, lo que mejora la detección de la variabilidad intraparcelaria y el monitoreo de cultivos en la agricultura de precisión (Vélez *et al.,* 2023; El-Jamaoui *et al.,* 2025).
Resultados similares a los obtenidos en este estudio han sido reportados en investigaciones recientes, en las que Sentinel-2 mostró limitaciones para detectar la heterogeneidad espacial en parcelas agrícolas con cobertura vegetal variable (Xie *et al.,* 2021).

3.3 Relación NDVI y Kc

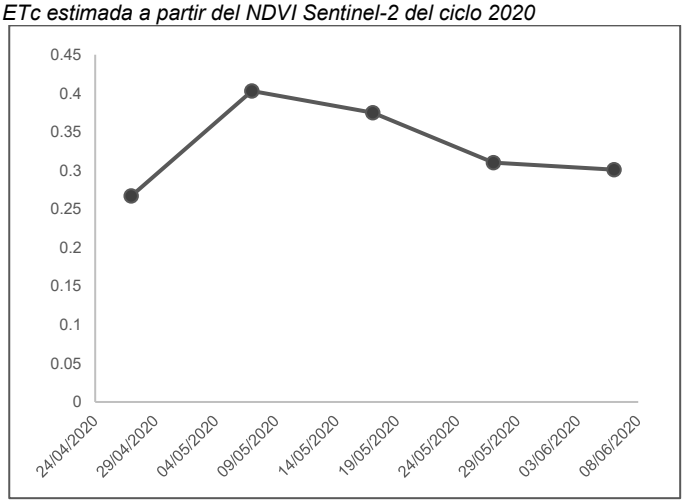
Para el Kc se utilizó la relación lineal de la ecuación 4. Los resultados indicaron que el Kc promedio estimado con Sentinel-2 fue de 0.545 mientras que el Kc obtenido con Sequoia fue de 0.692. Esta diferencia es consecuencia directa de los valores más altos de NDVI observados con el sensor del UAV.

El uso de un Kc derivado del NDVI permite representar dinámicamente el desarrollo del cultivo, a diferencia de los coeficientes tabulados, que asumen condiciones generales. Por ello, el empleo de sensores remotos fortalece la estimación de las necesidades hídricas al incorporar la variabilidad espacial y temporal del cultivo (Allen *et al.,* 1998; Glenn *et al.,* 2008).
Investigaciones recientes han demostrado que el NDVI derivado de sensores remotos puede utilizarse con éxito para estimar coeficientes de cultivo y de evapotranspiración en diferentes etapas fenológicas (Imtiaz *et al.,* 2023; Fong *et al.,* 2025).

3.4 Estimación de la ETc

Para la estimación de la ETc se utilizó el método descrito en la ecuación 5.
Según los cálculos realizados, la ETc promedio estimada con Sentinel-2 fue de 0.354, mientras que la ETc obtenida con Parrot Sequoia fue de 0.448. La diferencia promedio entre ambas estimaciones fue de 0.095 unidades, siendo mayor la estimación basada en el sensor UAV.
Este resultado confirma que las diferencias en el NDVI se trasladan directamente a la estimación de Kc y, posteriormente, a la ETc. En términos prácticos, subestimar el NDVI puede derivar en una subestimación de los requerimientos hídricos del cultivo, lo cual resulta relevante para la programación del riego en sistemas agrícolas de precisión.
De acuerdo con las Tablas 4 y 5, las mayores diferencias de ETc se observaron el 27 de abril de 2020, el 6 de junio de 2020 y el 7 de mayo de 2020, con diferencias promedio de 0.200, 0.196 y 0.180, respectivamente. Estas variaciones de ETc reflejan el impacto de la resolución espacial de los sensores en la estimación de variables asociadas al consumo de agua del cultivo.
Estudios recientes destacan que las tecnologías de percepción remota constituyen una herramienta eficiente para mejorar la estimación espacial de la evapotranspiración y optimizar el manejo del agua en sistemas agrícolas (Fong *et al.,* 2025).

Figura 5
ETc estimada a partir del NDVI Sentinel-2 del ciclo 2020



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID048

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 6
ETc estimada a partir del NDVI Sequoia del ciclo 2020

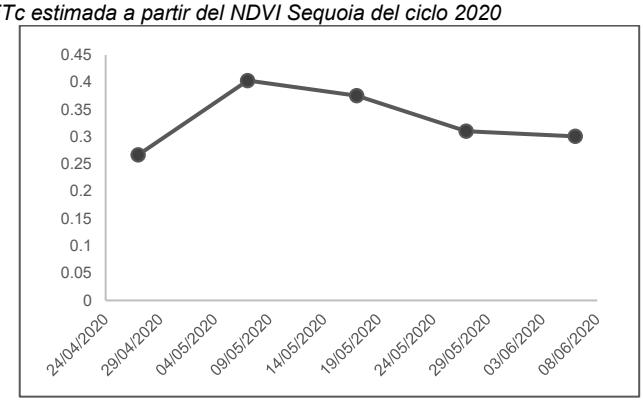


Figura 7
ETc estimada a partir del NDVI Sentinel-2 del ciclo 2021

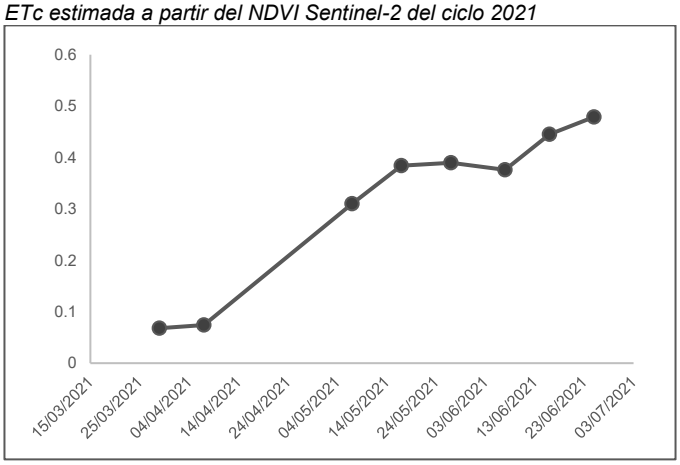
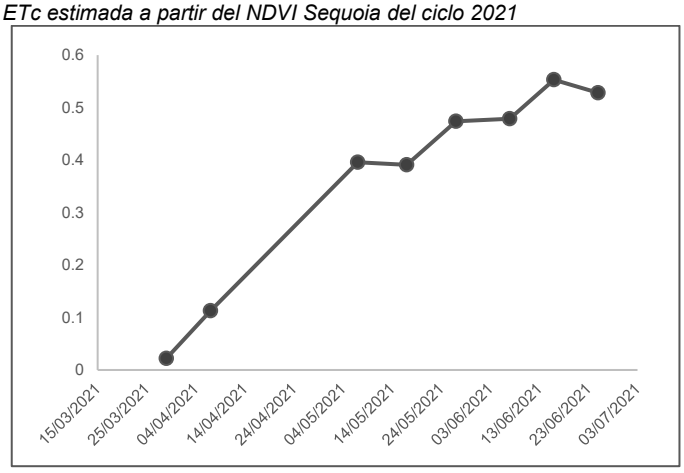


Figura 8
ETc estimada a partir del NDVI Sequoia del ciclo 2021



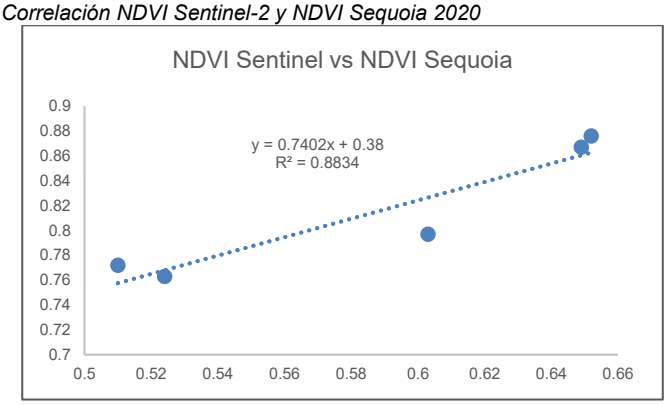
3.5 Correlación entre NDVI Sentinel-2 y NDVI Sequoia

El análisis de correlación mostró una relación positiva moderada entre los valores de NDVI obtenidos con Sentinel-2 y con Parrot Sequoia. El coeficiente de correlación de Pearson fue r = 0.9398, mientras que el coeficiente de determinación fue r² = 0.8834.

El modelo de regresión lineal obtenido fue:

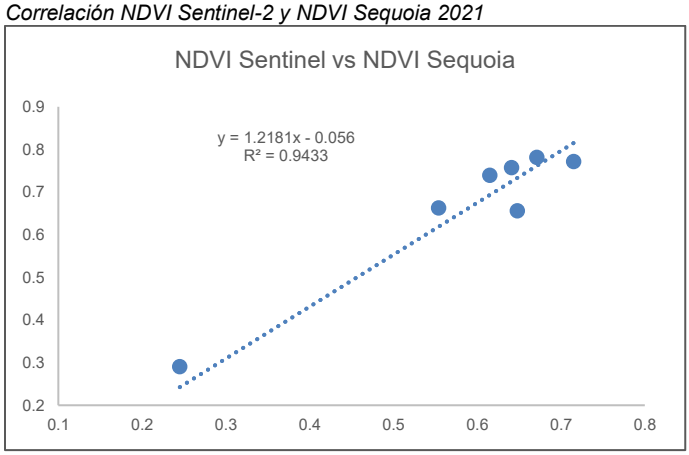
$$NDVI\ Sequoia\ =\ 0.38\ +\ 0.740(NDVI\ Sentinel - 2) \quad (7)$$

Figura 9
Correlación NDVI Sentinel-2 y NDVI Sequoia 2020



Estos resultados indican que aproximadamente el 88.3% de la variabilidad del NDVI Sequoia puede ser explicada por los valores de NDVI Sentinel-2. Aunque existe una tendencia positiva entre ambas fuentes de datos, la relación no es completamente directa debido a diferencias en la resolución espacial, la escala de observación, la geometría de adquisición, la calibración radiométrica y la heterogeneidad del dosel vegetal. La correlación moderada confirma que Sentinel-2 es útil para el monitoreo general del cultivo, mientras que Parrot Sequoia ofrece mayor sensibilidad para detectar la variabilidad intraparcelaria. Este comportamiento coincide con lo reportado por Zhang y Kovacs (2012), quienes señalan que los UAV permiten obtener información de muy alta resolución para aplicaciones de agricultura de precisión. Estudios recientes reportan comportamientos similares a los obtenidos, en los que los sensores UAV muestran una mayor capacidad para representar la estructura real del dosel vegetal y detectar la variabilidad espacial en comparación con plataformas satelitales de resolución media (Veléz *et al.,* 2023).

Figura 10
Correlación NDVI Sentinel-2 y NDVI Sequoia 2021



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID048

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

3.6 Discusión técnica de los resultados

Los resultados de este estudio demuestran que el sensor Parrot Sequoia registra valores de NDVI superiores a los de Sentinel-2 en la mayoría de las fechas evaluadas. Esta diferencia se atribuye principalmente a la resolución espacial centimétrica del UAV, que permite distinguir con mayor precisión la vegetación del suelo desnudo y de otros elementos presentes en la parcela. En contraste, Sentinel-2 integra la respuesta espectral de áreas de 10 m por píxel, lo que puede generar mezcla espectral, especialmente en parcelas con cobertura vegetal heterogénea. Este efecto puede disminuir el valor promedio del NDVI cuando dentro del píxel hay zonas con suelo expuesto, sombra o variabilidad en la densidad del cultivo.

Desde el punto de vista del manejo hídrico, las diferencias encontradas son relevantes, ya que el NDVI se utilizó como variable de entrada para estimar el Kc y, posteriormente, la ETc. Por lo tanto, una diferencia en el valor de NDVI puede modificar la estimación final de la demanda de agua del cultivo.

Los resultados sugieren que Sentinel-2 es una herramienta adecuada para el seguimiento regional y multitemporal de cultivos, debido a su cobertura espacial, disponibilidad gratuita y frecuencia de revisita. Sin embargo, para decisiones de manejo, como riego diferenciado o identificación de zonas de estrés, el uso del UAV con sensores multiespectrales ofrece mayor precisión espacial.

Las diferencias observadas entre Sentinel-2 y Parrot Sequoia pueden atribuirse al efecto de mezcla espectral asociado a la resolución espacial del satélite, especialmente en parcelas heterogéneas. Investigaciones recientes reportan comportamientos similares, en los que los sensores de UAV muestran una mayor capacidad para representar la estructura real del dosel vegetal (Vélez *et al.,* 2023; El-Jamaoiu *et al.,* 2025).

3.7 Implicaciones para la agricultura de precisión

La integración de imágenes satelitales y de sensores equipados en UAV representa una estrategia tecnológica útil para fortalecer la agricultura de precisión. Mientras Sentinel-2 permite analizar grandes superficies agrícolas a bajo costo, el sensor Parrot Sequoia permite obtener información detallada a nivel de parcela.

Con base en los resultados, el uso de NDVI derivado de UAV puede mejorar la identificación de zonas con diferente vigor vegetal y apoyar decisiones relacionadas con la programación de riego, estimación de necesidades hídricas, detección de estrés en el cultivo, manejo diferenciado por zonas y la optimización del uso del agua.

En regiones semiáridas, donde el recurso hídrico es limitado, este tipo de herramientas resulta especialmente importante para mejorar la eficiencia del riego y reducir las pérdidas de agua.

Aunque los resultados muestran una relación clara entre ambas fuentes de información, es importante considerar algunas limitaciones. En primer lugar, las diferencias en la fecha y la hora de adquisición entre Sentinel-2 y UAV pueden influir en los valores espectrales registrados. Asimismo, factores como la nubosidad, las sombras, la humedad del suelo, el ángulo solar y la calibración radiométrica pueden introducir variabilidad en los datos.

También se debe considerar que la ecuación utilizada para transformar NDVI a Kc es una aproximación lineal, por lo que su precisión puede variar según el tipo de cultivo, etapa fenológica y condiciones locales. Por ello, se recomienda complementar futuras investigaciones con mediciones de campo, sensores de humedad del suelo, lisímetros o estaciones de flujo para validar la estimación de ETc.

Por último, aunque el UAV ofrece mayor detalle espacial, su uso implica mayores requerimientos operativos, procesamiento fotogramétrico y limitaciones de cobertura, mientras que Sentinel-2 permite análisis regionales de forma gratuita y periódica.

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar la relación entre los valores de NDVI obtenidos a partir de imágenes de Sentinel-2 y de un sensor multiespectral Parrot Sequoia montado en un vehículo aéreo no tripulado (UAV), así como su aplicación para estimar el coeficiente de cultivo Kc y la evapotranspiración del cultivo ETc en condiciones agrícolas del área de estudio.

Los resultados mostraron que el sensor Sequoia presentó valores de NDVI consistentemente superiores a los de Sentinel-2 durante la mayor parte de los ciclos agrícolas analizados. La diferencia promedio general del NDVI fue de aproximadamente 0.118 unidades, lo que evidencia el efecto de la resolución espacial en la representación espectral del cultivo. La alta resolución espacial del UAV permitió reducir el efecto de mezcla espectral generado por el suelo desnudo, las sombras y la heterogeneidad del dosel vegetal dentro de los píxeles satelitales.

La estimación del coeficiente de cultivo mediante las relaciones NDVI-Kc permitió obtener valores dinámicos que reflejan el comportamiento real del cultivo. Los valores de Kc derivados de Sequoia fueron superiores respecto a Sentinel-2, reflejando una mayor sensibilidad del sensor UAV para determinar diferencias de vigor vegetativo y cobertura foliar.

El análisis estadístico mostró una correlación positiva moderada entre ambas plataformas. Durante el ciclo agrícola 2020 se obtuvo un coeficiente de correlación de r = 0.9398, mientras que en 2021 fue de r = 0.9712. Estos resultados indican que Sentinel-2 puede emplearse de manera eficiente para el monitoreo agrícola regional y el análisis multitemporal; sin embargo, los sensores UAV ofrecen ventajas importantes para aplicaciones de agricultura de precisión y de monitoreo detallado a escala parcelaria.

Finalmente, se concluye que ambas tecnologías deben considerarse complementarias en los sistemas modernos de agricultura de precisión. Sentinel-2 proporciona cobertura regional y monitoreo continuo de grandes superficies agrícolas, mientras que los sensores UAV permiten caracterizar con mayor detalle la variabilidad espacial del cultivo y mejorar la precisión en la estimación de variables biofísicas asociadas al manejo hídrico.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID048

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México, al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo y al Instituto Tecnológico de Torreón por el apoyo académico y técnico brindado para el desarrollo de esta investigación.
También reconocemos a la Agencia Espacial Europea (ESA) por proporcionar acceso libre a los datos de satélite y al INIFAP por los datos de la estación meteorológica.

VI. REFERENCIAS

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization.

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F. y Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment, 120*, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026

El-Jamaoui, I., Boulfiza, M., El Ansari, M. y Labbassi, K. (2025). A comparative assessment of Sentinel-2 and UAV-based imagery for precision agriculture applications. *Sensors, 25*(17), 5281. https://doi.org/10.3390/s25175281

Fong, T. Y., Chen, X., Wang, Y. y Liu, Z. (2025). Advancing evapotranspiration estimation with remote sensing technologies. *Agricultural Water Management, 312*, 109271. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109271

Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L. y Nelson, S. G. (2008). Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors, 8*(4), 2136–2160. https://doi.org/10.3390/s8042136

Imtiaz, F., Ahmed, S., Khan, M. y Ali, R. (2023). Remote sensing approaches for evapotranspiration estimation in agriculture. *Frontiers in Remote Sensing, 4*, 1274019. https://doi.org/10.3389/frsen.2023.1274019

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Censo de población y vivienda 2020*. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/

Jensen, J. R. (2015). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4.a ed.). Pearson.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. y Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication, 351*, 309–317.

Sishodia, R. P., Ray, R. L. y Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing, 12*(19), 3136. https://doi.org/10.3390/rs12193136

Vélez, S., Ariza-Sentís, M. y Valente, J. (2023). Benchmarking the reliability of Sentinel-2 satellite data for estimating NDVI through UAV multispectral imagery. *Environmental Sciences Proceedings, 29*(1), 58. https://doi.org/10.3390/environsciproc2023029058

Xie, Y., Zhang, Y., Li, X. y Wang, S. (2021). Review of Sentinel-2 applications in agriculture and vegetation monitoring. *Remote Sensing, 13*(5), 817. https://doi.org/10.3390/rs13050817

Zhang, C. y Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture, 13*(6), 693–712. https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización [Conceptualization]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández
2	Curación de datos [Data curation]	Alan Joel Servín Prieto, Tania Elizabeth Velásquez Chávez
3	Análisis formal [Formal analysis]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Alan Joel Servín Prieto
5	Investigación [Investigation]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández, Tania Elizabeth Velasquez Chávez, Mónica Hernández López y Raymundo Adame Delgado
6	Methodología [Methodology]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández
7	Administración del proyecto [Project administration]	Alan Joel Servín Prieto
8	Recursos [Resources]	Alan Joel Servín Prieto
9	Software [Software]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández
10	Supervision [Supervision]	Tania Elizabeth Velásquez Chávez, Mónica Hernández López
11	Validación [Validation]	Tania Elizabeth Velásquez Chávez, Mónica Hernández López
12	Visualización [Visualization]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Alan Joel Servín Prieto
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández, Tania Elizabeth Velásquez Chávez, Mónica Hernández López y Raymundo Adame Delgado

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID048

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Simulador Web Educativo De Negocios

Educational Web Business Simulator

Morales-Venegas, D.S.[1]; Rodríguez-Chacón, R.L.[2]; Morales-Flores, R.M.[3]; Tinoco-Alcázar, I.[4]; Rodríguez-Campos, F.E.[5]

Datos de Adscripción:

[1] Morales Venegas, Diana Sarahi
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
diana.mv@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2515-6752

[2] Rodríguez, Chacón, Rocio Lorena
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
rocio.rc@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0842-1585

[3] Morales, Flores, Rosa María
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
rosa.mf@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7943-3408

[4] Tinoco, Alcázar, Irma
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
irma.ta@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9271-0449

[5] Rodríguez, Campos, Francisco Eduardo
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
francisco.rc@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5276-3681

Resumen **- El simulador web educativo de negocios es una aplicación desarrollada para que los estudiantes experimenten el emprendimiento en un entorno virtual mediante la recreación de situaciones reales del ámbito empresarial, facilitando la toma de decisiones en áreas como finanzas, recursos y operaciones, así como el análisis de sus efectos. Su desarrollo se realizó mediante una metodología evolutiva basada en el crecimiento incremental del sistema y la mejora continua a partir de la retroalimentación de los usuarios, incluyendo análisis de requerimientos, diseño de interfaz, desarrollo de módulos y pruebas de funcionamiento y usabilidad. Como resultado, se obtuvo un simulador funcional y estable que cumple con los objetivos planteados y sirve como herramienta de apoyo al aprendizaje, integrando teoría y práctica para fortalecer habilidades analíticas y estratégicas en la formación académica de los estudiantes.**

Palabras Clave: Aprendizaje activo, Emprendimiento, Entorno virtual de aprendizaje, Simulación de negocios, Simulador web.

Abstract **- The educational web-based business simulator aims to be an application that allows students to experience entrepreneurship in a virtual environment. The scope of the study focuses on the development of an interactive tool that recreates real-world business situations, facilitating decision-making in areas such as finance, resources, and operations, among others, as well as the analysis of their effects. The methodology used corresponds to an evolutionary approach, based on the incremental development of the system and continuous improvement through user feedback. The process included requirements analysis through surveys, interface and system structure design, progressive development of its modules, and testing to evaluate its performance and usability, incorporating improvements derived from the obtained results. As a result, a functional simulator was obtained that meets the proposed objectives and satisfies basic needs as a learning support tool. The system allows the recreation of practical scenarios, facilitates decision-making, and operates stably in its initial version. In conclusion, the simulator is an effective tool for active learning, as it integrates theory with practice and promotes the development of analytical and strategic skills, adding value to students' academic training.**

Keywords: Active learning, Business simulation, Entrepreneurship, Virtual learning environment, Web-based simulator.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio en los entornos empresariales y la creciente complejidad de los procesos de toma de decisiones han generado la necesidad de aplicar en la educación superior estrategias de enseñanza que vinculen la práctica con los conocimientos teóricos. En los programas relacionados con la gestión empresarial, la administración y las tecnologías de la información, es necesario integrar conocimientos de diferentes áreas funcionales, evaluar alternativas, analizar información y tomar decisiones en condiciones de incertidumbre. En este contexto, las metodologías de aprendizaje activo van adquiriendo importancia como alternativas para la participación dinámica del estudiante y una mayor conexión entre teoría y práctica (Misseyanni, Lytras, Papadopoulou, & Marouli, 2018).

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID050

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Entre estas estrategias se encuentran los simuladores de negocios, definidos como entornos de aprendizaje que representan, mediante modelos dinámicos, determinadas condiciones y relaciones presentes en una organización o mercado, permitiendo a los participantes tomar decisiones y analizar sus consecuencias. Su desarrollo ha evolucionado desde los primeros juegos empresariales utilizados en el siglo XX hasta plataformas digitales capaces de incorporar múltiples variables relacionadas con las finanzas, la mercadotecnia, la producción, las operaciones y la estrategia empresarial. Esta evolución tecnológica ha ampliado las posibilidades de utilizar la simulación como recurso didáctico en diferentes áreas de la educación superior (Goi, 2019).

El valor educativo de los simuladores de negocios se relaciona en particular con la capacidad para generar experiencias de aprendizaje basadas en la toma de decisiones y la retroalimentación. El estudiante participa en un escenario en el que sus decisiones producen consecuencias sobre el comportamiento de una empresa virtual. Lo que favorece la integración de conocimientos y el desarrollo de habilidades relacionadas con el análisis, la resolución de problemas y la toma de decisiones. La simulación empresarial es una estrategia que puede brindar al estudiante experiencia en situaciones complejas sin exponerlo a las consecuencias de la pérdida de capital invertido, lo que implicaría experimentar directamente en una organización real (Olguin-Villalobos, Ventura-Aguilar, Zavaleta-López, & Moncada-Torres, 2026).

La evidencia empírica disponible respalda el interés creciente por este tipo de herramientas. Faisal et al. (2022), mediante una revisión sistemática de 57 estudios empíricos, identificaron que los juegos de simulación empresarial utilizados en educación superior se han relacionado con resultados de aprendizaje asociados con la adquisición de conocimientos, el desarrollo de habilidades cognitivas e interactivas y determinados comportamientos. No obstante, los autores también señalan que los resultados de aprendizaje no dependen exclusivamente de la utilización del simulador, sino de factores relacionados con su diseño, implementación, integración curricular y mediación pedagógica.

Desde esta perspectiva, el simulador no debe entenderse únicamente como una herramienta tecnológica, sino como un componente de una estrategia didáctica que requiere objetivos de aprendizaje claramente definidos, actividades estructuradas y procesos de reflexión sobre las decisiones adoptadas. Buil et al. (2019) encontraron que el uso de juegos de simulación empresarial puede relacionarse con la motivación intrínseca de los estudiantes, mientras que Hernández-Lara et al. (2019) mostraron la utilidad de las técnicas de analítica del aprendizaje para examinar las interacciones de los participantes durante este tipo de experiencias. Estos resultados sugieren que el valor educativo de la simulación puede analizarse no solo a partir del resultado final obtenido por una empresa virtual, sino también a partir del comportamiento, la interacción y el proceso de aprendizaje desarrollado durante la actividad.

Asimismo, la incorporación de tecnologías digitales ha permitido ampliar las posibilidades de los simuladores mediante plataformas en línea, sistemas de seguimiento y herramientas de análisis de datos. Esta evolución resulta particularmente relevante en la educación superior, debido a que permite generar evidencias sobre las decisiones de los estudiantes y sus patrones de interacción. Sin embargo, la disponibilidad de tecnología no garantiza por sí misma el desarrollo de competencias profesionales. La literatura señala la necesidad de estudiar las condiciones pedagógicas bajo las cuales estas herramientas producen resultados favorables y de establecer mecanismos de evaluación que permitan identificar con mayor precisión los aprendizajes derivados de la experiencia de simulación (Faisal et al., 2022).

Los simuladores empresariales pueden integrarse en programas digitales dirigidos a estudiantes orientados a la formación de empresas. Generando evidencias sobre el uso de simuladores para el desarrollo de competencias, la toma de decisiones que se puedan aplicar en materias que estén dentro de la currícula escolar. Este aspecto resulta relevante porque una misma herramienta de simulación puede generar experiencias de aprendizaje distintas según la estructura de la actividad, el acompañamiento docente, el nivel de complejidad y los mecanismos de evaluación empleados.
El presente trabajo desarrolla un simulador web educativo de negocios, orientado a estudiantes de distintas carreras y profesiones interesados en fortalecer competencias relacionadas con la gestión empresarial. La herramienta permite recrear escenarios relacionados con finanzas, recursos y operaciones en un entorno virtual y controlado, lo que favorece el pensamiento crítico, la toma de decisiones y el análisis estratégico.

El sistema se desarrolla mediante un modelo evolutivo de software con enfoque iterativo e incremental, empleando tecnologías como MySQL, Laravel, PHP, HTML, CSS y JavaScript. Obteniendo un simulador funcional que integra la teoría con la práctica y ofrece un espacio seguro para el aprendizaje y análisis de estrategias de negocio.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

En esta sección se describen la metodología de desarrollo adoptada, la especificación de requisitos bajo la norma IEEE 830, el diseño conceptual en Lenguaje de Modelado Unificado (UML), el prototipado de interfaz, el modelado relacional de la base de datos, la arquitectura del software basada en el patrón Modelo-Vista-Controlador (MVC), la lógica algorítmica y reglas de negocio del simulador, la estrategia de verificación mediante pruebas piloto, y las especificaciones de infraestructura para la implementación institucional.

2.1 Metodología del Desarrollo

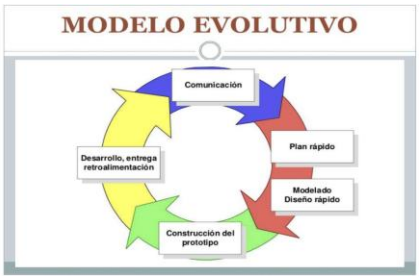
El sistema se desarrolló mediante un modelo evolutivo e incremental que permite el crecimiento progresivo del software a través de entregas funcionales iterativas (Sommerville, 2011). Esta metodología modular se adapta a requisitos cambiantes al someter cada componente a ciclos de análisis, diseño, codificación, implementación y pruebas, e integrar mejoras continuas en cada versión (Pressman & Maxim, 2021).

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID050

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

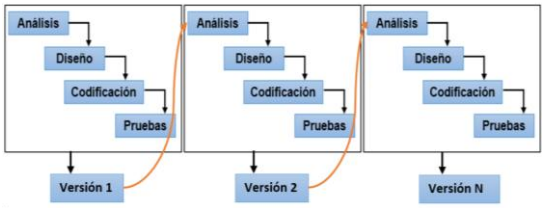
Para el análisis del sistema se utilizaron dos metodologías complementarias: la estructurada y la orientada a objetos. La primera permitió describir las funciones del sistema y el flujo de información entre sus procesos, mientras que la segunda se apoyó en el Lenguaje de Modelado Unificado (UML), utilizando diagramas de casos de uso para representar el comportamiento del sistema desde la perspectiva de los usuarios y la interacción que mantienen con el entorno (Muller, 1997).

Figura 1
Metodología de desarrollo evolutivo.



Nota. Adaptado de *Ingeniería del software: Un enfoque práctico*, por R. S. Pressman y B. R. Maxim, 2021, McGraw-Hill.

Figura 2
Metodología de desarrollo incremental.



Nota. Adaptado de *Ingeniería del software: Un enfoque práctico*, por R. S. Pressman y B. R. Maxim, 2021, McGraw-Hill.

2.2 Especificación de Requisitos de Software bajo el Estándar IEEE 830

En la fase inicial del proyecto se realizó un análisis para validar el desarrollo de un simulador web educativo de negocios como herramienta de apoyo al aprendizaje, identificando necesidades académicas y tecnológicas relacionadas con la enseñanza de temas empresariales y la aplicación práctica del conocimiento. El estudio permitió reconocer la importancia de contar con entornos virtuales que faciliten la toma de decisiones, el análisis estratégico y la simulación de escenarios empresariales en un entorno controlado. Asimismo, se analizaron los procesos de aprendizaje y las dificultades de los estudiantes para aplicar la teoría a situaciones reales.

A partir de este diagnóstico, se llevó a cabo el proceso formal de elicitación y especificación de los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema, tomando como referencia el estándar IEEE 830 para la especificación de requisitos de software (Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE], 1998). La adopción de esta norma garantizó que los requisitos especificados fueran unívocos, verificables, trazables y estructurados de acuerdo con las necesidades operativas identificadas. A partir de este estándar, fue posible clasificar los distintos roles de usuarios involucrados y establecer sus responsabilidades dentro de la solución tecnológica.

Tabla 1
Identificación del Requerimiento Funcional RF05 Alumno–Consulta de reportes.

Identificación del requerimiento	*Nombre*	*Características*	*Descripción*
RF05	Consulta de reportes	Obligatorio (Prioridad Alta). Módulo de salida de información y visualización de datos.	El sistema deberá permitir al usuario con rol "Alumno" consultar y visualizar los reportes ejecutivos e indicadores de desempeño en su escenario de simulación.

Tabla 2
Identificación del Requerimiento No Funcional RNF19 Global –Usabilidad e interfaz intuitiva.

Identificación del requerimiento	*Nombre*	*Características*	*Descripción*
RNF19	Usabilidad e interfaz intuitiva	Atributo de calidad / Usabilidad. Basado en componentes estándar de diseño web (Bootstrap) y patrones UX.	El sistema dispondrá de una interfaz gráfica intuitiva y adaptativa (responsive, que facilite la navegación y el aprendizaje autónomo del usuario

2.3 Diseño de Casos de Uso (UML) y Prototipado Estructural y Modelo de Base de Datos

Una vez formalizada la especificación de requerimientos mediante el estándar IEEE 830, se procedió con la fase de modelado orientado a objetos. En esta etapa se definieron los requerimientos del sistema mediante diagramas de casos de uso en Lenguaje de Modelado Unificado (UML), mapeando las interacciones entre los actores principales (Administrador, Docente y Alumno) y los procesos de la plataforma

A la par de la abstracción UML, se desarrolló un prototipo estructural con los módulos principales para evaluar su funcionamiento, navegación y usabilidad inicial de manera temprana. Este prototipo permitió validar visualmente los flujos de trabajo previamente modelados en los casos de uso, garantizando una transición fluida hacia la fase de codificación en el entorno web.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID050

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 3
Diagrama de casos de uso de interacción del alumno con el sistema.

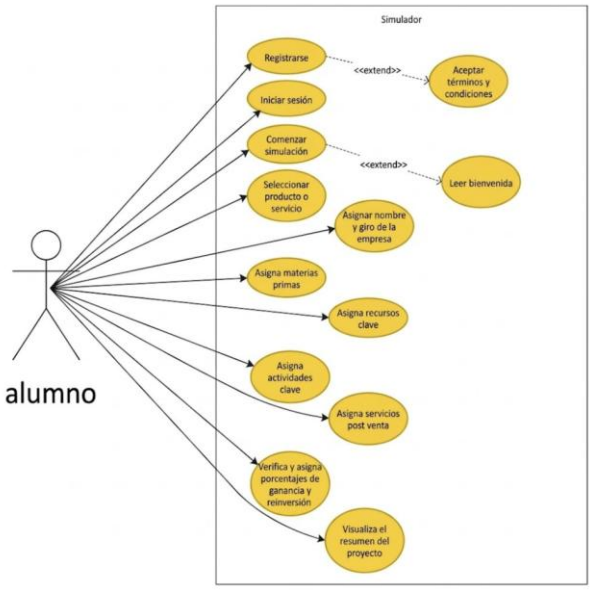
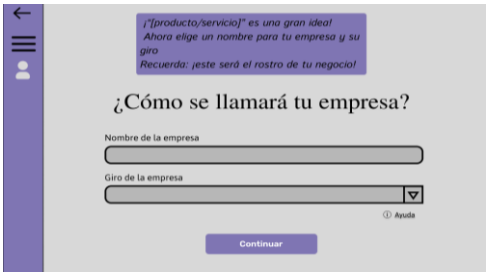


Figura 4
Pantalla prototipo nombre y giro de la empresa.



Como siguiente paso, se procedió con el diseño lógico y relacional de la base de datos. A continuación, la figura 5 presenta el diagrama entidad-relación correspondiente a la base de datos del sistema, donde se ilustran las tablas principales y las relaciones lógicas entre ellas. Esta representación estructural es esencial para garantizar la integridad y coherencia de los datos, permitiendo un almacenamiento organizado y una gestión eficiente de la información. Dentro de este modelo, entidades como empresa, Alumno_user, simulacion, materia_prima y reporte articulan la información operativa y financiera, asegurando una trazabilidad completa de cada iteración realizada por los usuarios.

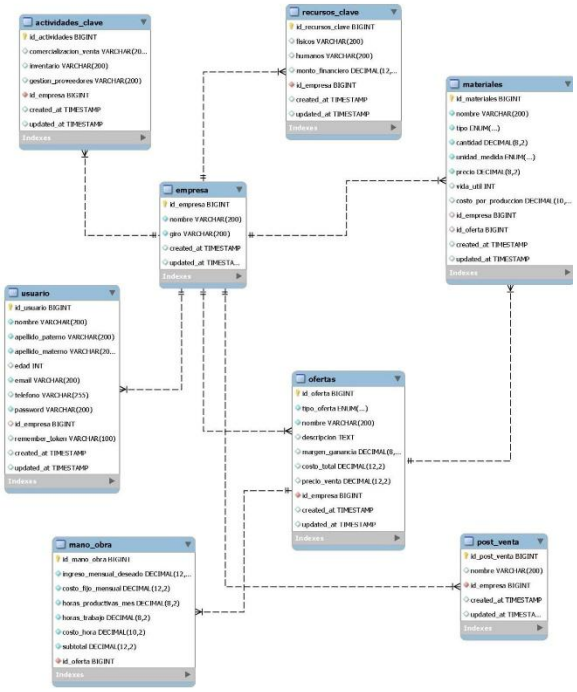
2.3 Arquitectura del Software y Tecnologías Implementadas

La estructura computacional del sistema se diseñó sobre el patrón arquitectónico Modelo-Vista-Controlador (MVC), el cual promueve la separación de responsabilidades entre la capa de presentación, la lógica del negocio y la persistencia de datos.

A. Capa Backend (Modelo y Controlador).

Construida en PHP, utilizando el framework Laravel. La lógica operante del simulador se distribuyó en controladores especializados como EmpresaController (gestión del ciclo de vida de la empresa virtual), CatalogoController (administración de rubros e insumos), OfertaController (procesamiento de precios e interacciones de mercado) y SimuladorController (ejecución de algoritmos financieros y generación de escenarios). Para la interacción con la base de datos, se empleó el mapeador objeto-relacional (ORM) Eloquent, lo que permitió mapear las entidades relacionales de la Figura 6 como modelos orientados a objetos con relaciones lógicas de pertenencia y asociación.

Figura 5
Modelo de base de datos.



Para ejemplificar la implementación de la capa de controladores bajo la arquitectura MVC, el siguiente código muestra la estructura interna del OfertaController, responsable de gestionar las solicitudes del usuario y coordinar las vistas correspondientes:

```
<?php
namespace App\Http\Controllers;
use Illuminate\Http\Request;
class OfertaController extends Controller {
    public function index(): Factory|View {
        return view('pages.selección'); }
    public function seleccionarProducto(): Factory|View {
        return view('pages.seleccionProducto'); }
    public function seleccionarServicio(): Factory|View {
        return view('pages.seleccionServicio'); }
    public function crearProducto(): Factory|View {
        return view('ofertas.crear_producto'); }
    public function crearServicio(): Factory|View {
        return view('ofertas.crear_servicio'); }
}
```

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID050

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

B. Capa Frontend (Vista).

La capa de Frontend fue desarrollada mediante tecnologías web estándar (HTML5, CSS3 y JavaScript), integrando el framework Bootstrap para asegurar una interfaz adaptativa (responsive) e intuitiva en diferentes dispositivos. La comunicación entre la interfaz de usuario y el servidor se complementó con peticiones HTTP asíncronas (AJAX), facilitando el cálculo dinámico de costos e indicadores financieros sin requerir la recarga completa de la página. Tal como se ilustra en la Figura 6, el módulo «Servicios e Ingresos» captura las variables operativas en tiempo real y procesa automáticamente las proyecciones de rentabilidad en la misma vista.

Figura 6

Interfaz de usuario del módulo «Servicios e Ingresos» desarrollada con Bootstrap y JavaScript para la captura de datos y el cálculo dinámico de indicadores financieros.

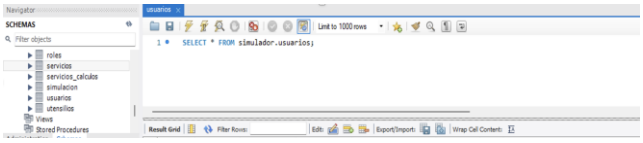


C. Capa de Persistencia (Base de Datos):

Basada en el sistema de gestión de bases de datos relacional MySQL operando con el motor InnoDB, garantizando el cumplimiento de las propiedades ACID (Atomicidad, Consistencia, Aislamiento y Durabilidad) y preservando las restricciones de integridad referencial especificadas en el diagrama E-R. La administración del esquema y la optimización de consultas se realizaron mediante phpMyAdmin y MySQL Workbench, tal como se aprecia en la Figura 7, donde se ilustra la estructura de tablas del esquema simulador y la verificación de registros persistidos.

Figura 7

Administración del esquema de la base de datos en MySQL Workbench.



El control de versiones se realizó con Git, lo que facilitó la colaboración y el seguimiento de cambios en el código, mientras que Visual Studio Code se utilizó como entorno de desarrollo por sus herramientas de productividad.

2.4 Algoritmos y Reglas de Negocio del Simulador

El núcleo del Simulador Web Educativo De Negocios está constituido por un motor algorítmico parametrizable alojado en la capa de controladores de Laravel (SimuladorController, OfertaController y CatalogoController). Este motor procesa secuencialmente la captura de datos operacionales, el cálculo de costos, la proyección de utilidades y la generación de escenarios.

A. Conceptualización Didáctica y Captura de Parámetros de Emprendimiento

Para guiar el proceso de enseñanza-aprendizaje, la plataforma integra un entorno pedagógico interactivo que despliega definiciones formales de los conceptos empresariales antes y durante el llenado de formularios. Esto permite al estudiante comprender el impacto financiero de cada decisión estratégica al emprender con productos o servicios.
El flujo algorítmico de captura recolecta y valida de forma estructurada los siguientes bloques de información.

1) Identidad de la Empresa: Nombre comercial y selección del giro empresarial (Industrial, Comercial o Servicios).

2) Definición de Oferta: Selección o registro del producto tangible o servicio intangible objeto del emprendimiento.

3) Materia Prima e Insumos: Desglose detallado de insumos directos y utensilios/herramientas requeridos para la producción o la prestación.

4) Recursos Clave: Clasificación y costeo de recursos en tres categorías principales: Físicos:(maquinaria, equipo e instalaciones). Humanos: Personal operativo, administrativo y mano de obra. Financieros: Capital inicial y líneas de liquidez.

5) Actividades Clave: Costeo de procesos operativos fundamentales distribuidos en comercialización y venta, control de inventario y gestión de proveedores.

Servicios Posventa: Asignación de presupuestos para la fidelización y valor agregado, tales como mantenimientos, pólizas de garantía y programas de recompensas.

B. Lógica Algorítmica de Costeo y Determinación de Precio de Venta

La plataforma procesa la sumatoria de los insumos directos, la amortización de recursos clave, los costos de actividades operativas y la estimación de costos de posventa para establecer el costo unitario total de producción o servicio. A partir de este valor de referencia, el algoritmo integra el margen de utilidad deseado para calcular dinámicamente el precio final de venta al mercado.

C. Resumen Interactivo y Ajuste Dinámico de Escenarios

Una vez ingresados los datos base, la plataforma habilita un resumen interactivo en la interfaz de usuario. En este módulo, mediante peticiones asíncronas vía AJAX, los estudiantes pueden manipular deslizadores y porcentajes en tiempo real para evaluar sensibilizaciones de mercado sin alterar los registros originales de la base de datos. Se recalculan instantáneamente las proyecciones al modificar las siguientes variables dinámicas: Producción, Costo por Unidad, Precio de Venta, Inversión Realizada, Ganancia y Capital para Reinversión.

D. Generación Automatizada de Reporte Ejecutivo

Como fase final del algoritmo, la vista «Resumen del Proyecto» consolida automáticamente la información de la empresa, la estructura de costos y la estrategia de posventa. A

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID050

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

partir de estos datos, el sistema calcula en tiempo real los ingresos diarios, los costos totales y la ganancia neta, dividiendo este flujo en utilidad personal y capital para reinversión. Finalmente, la plataforma permite exportar el reporte ejecutivo consolidado para la evaluación docente y el análisis del estudiante.

2.5 Verificación y pruebas locales

Se llevó a cabo una revisión detallada para garantizar que el sistema cumpliera con los requisitos definidos en la etapa de análisis y que las funciones asignadas a cada rol estuvieran correctamente establecidas. Posteriormente, la plataforma se desplegó en un entorno local para llevar a cabo una prueba piloto con un grupo de 20 estudiantes. Esta fase permitió recabar retroalimentación directa, identificar áreas de mejora oportunas, validar el correcto funcionamiento de los módulos y asegurar el cumplimiento de las especificaciones funcionales antes de su despliegue institucional definitivo.

Figura 8
Etapa de verificación y pruebas locales.



2.5 Implementación

Concluidas las etapas de desarrollo, pruebas funcionales y validación del sistema en un entorno local, el siguiente paso fue implementar el simulador de negocios en un entorno institucional. Se realizaron los ajustes que surgieron de las pruebas efectuadas, con el propósito de verificar el funcionamiento de sus principales módulos, corregir inconsistencias, y garantizar la integración adecuada de su funcionalidad.

Esta implementación tuvo como finalidad que los usuarios pusieran en funcionamiento el simulador en un ambiente controlado, permitiendo su utilización como herramienta de apoyo al proceso de enseñanza-aprendizaje. En esta etapa se tuvieron consideraciones en los aspectos relacionados con la configuración del sistema, acceso de los usuarios, disponibilidad de los recursos tecnológicos, y operación de la funcionalidad destinada a la creación y gestión de emprendimiento virtual. Estas acciones permitieron comprobar la estabilidad operativa de la plataforma y detectar posibles incidencias asociadas a su uso en condiciones reales.

La plataforma se configuró para su migración e implementación formal en el servidor institucional definitivo, bajo el siguiente entorno de producción:

1. Servidor físico: HP ProLiant DL380 Gen9
2. Memoria RAM: 4 GB virtuales
3. Procesador: Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2650 v3 @ 2.30GHz (2 núcleos virtuales)
4. Almacenamiento: 150 GB de disco duro
5. Red: 2 tarjetas de red virtuales Gigabit
6. Sistema operativo: Ubuntu 24.04 LTS
7. PHP: 7.4.33
8. Composer: 2.7.6
9. Base de datos: MySQL 8.0.39

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se consolidó una plataforma web interactiva para la simulación de emprendimientos que articula exitosamente las dimensiones: técnica, pedagógica y de gestión empresarial. En la capa técnica, la arquitectura bajo el patrón MVC en Laravel y MySQL, junto con peticiones asíncronas vía AJAX, habilita el cómputo dinámico de la estructura analítica de costos y la proyección de rentabilidad, garantizando un ciclo de retroalimentación inmediata durante la simulación de escenarios. Desde la perspectiva pedagógica y administrativa, el sistema unifica las áreas funcionales del negocio en un entorno controlado, reduciendo la carga mental procedimental del estudiante. Esta abstracción operativa encauza la atención directamente hacia el desarrollo del pensamiento crítico, permitiendo al alumnado evaluar hipótesis de mercado, analizar la sensibilidad de variables financieras y contrastar múltiples escenarios operacionales para fundamentar una toma de decisiones estratégica e informada.

3.1 Interfaz y pantallas del sistema

Con el propósito de sintetizar el flujo de trabajo del sistema y optimizar la presentación gráfica del artículo, los módulos de interfaz de usuario se agrupan en las siguientes etapas representativas.

A. Autenticación de usuarios.

Integra las pantallas de inicio de sesión, el registro de nuevos usuarios en la base de datos y la aceptación formal de términos y condiciones de uso del sistema.

Figura 9
Interfaz de inicio de sesión



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID050

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

B. *Selección del modelo de negocio y catálogo de giros*.

Muestra la interfaz interactiva para la elección de la tipología del emprendimiento (Producto o Servicio) y la navegación por sus respectivos catálogos temáticos (alimentos, cosméticos, ropa, servicios digitales, estética, entre otros).

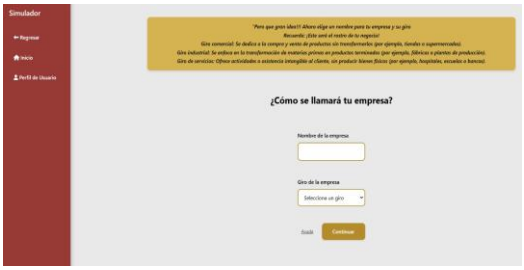
Figura 10
Interfaz Selección.



C. Configuración inicial y alta del proyecto.

Ilustra el módulo en el que el usuario define la idea de negocio, asigna la razón social o el nombre comercial y establece la clasificación formal del giro en el sistema.

Figura 11
Interfaz de asignación de nombre y giro.



D. Gestión operacional y recursos clave.

Engloba la parametrización de insumos, determinación de materias primas, asignación de recursos (físicos, humanos y financieros) y la definición de actividades clave y post-venta.

Figura 12
Interfaz de asignación de materia prima.



E. Cálculo financiero y proyecciones.

Presenta la interfaz de cómputo donde se determinan los costos de producción, proyecciones de ingresos, estimación de ganancias netas y la distribución del porcentaje de reinversión.

Figura 13
Interfaz de ganancia y reinversión.



F. Reporte y resumen ejecutivo del proyecto.

Muestra el panel final consolidado que integra la ficha técnica completa del emprendimiento simulado, compilando los datos generales, operacionales y financieros ingresados por el usuario.

Figura 14
Interfaz resumen del proyecto.



3.2 Evaluación de usabilidad y funcionamiento

La usabilidad y aceptación de la plataforma se evaluaron mediante un cuestionario estructurado de percepción por dimensiones funcionales, basado en una escala Likert de 5 puntos (donde 1=Totalmente en desacuerdo y 5=Totalmente de acuerdo), aplicado a la muestra de estudiantes (N=20) tras finalizar la prueba piloto. Los criterios evaluados, sus promedios y desviaciones estándar (σ) se resumen en la Tabla 1.

Tabla 3
Resultados de la evaluación de usabilidad por dimensiones funcionales.

	Criterios clave incluidos	*Calificación (promedio ± σ) % Aceptabilidad*
Usabilidad e interfaz	Claridad de acceso, diseño intuitivo y navegación general.	4.25±0.51 85%
Configuración operativa	Selección de giro, asignación de materia prima y recursos clave.	4.10±0.58 82%

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID050

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Cálculo financiero	Automatización de costos, proyección de ganancias y reinversión.	4.15±0.52 83%
Reporte ejecutivo	Consolidación clara de la ficha técnica y resultados globales.	4.35±0.49 87%
Valor pedagógico	Vinculación teoría-práctica e intención de uso futuro.	4.15±0.53 83%
Promedio Global	Aceptabilidad general del sistema	4.20±0.53 84%

Los datos obtenidos reflejan un nivel de aceptabilidad general del 84%. La dimensión con mayor valoración corresponde a la consolidación del reporte ejecutivo, lo que evidencia que la ficha técnica sintetizada ayuda al estudiante a interpretar de forma rápida la viabilidad de su negocio. Las bajas desviaciones estándar ($\sigma \leq 0.58$) confirman un alto nivel de consenso entre los usuarios evaluados.

3.4 Discusión

Las pruebas operativas y la evaluación de usabilidad confirmaron la efectividad del simulador web como una herramienta integral de apoyo al aprendizaje activo. El nivel de aceptabilidad general del 84% (4.20±0.53, N=20) demuestra tanto la estabilidad del software como la pertinencia de su diseño funcional para recrear entornos empresariales complejos.

Desde la perspectiva pedagógica, los resultados concuerdan con lo planteado por Goi (2019) respecto al valor de la simulación como un recurso didáctico versátil en la educación superior. La elevada valoración del Reporte ejecutivo (87.0%) evidencia cómo la automatización de cálculos reduce la carga mental procedimental, permitiendo al estudiante centrarse en la interpretación de los datos y el análisis de consecuencias. Este aspecto se vincula directamente con los hallazgos de Buil et al. (2019), quienes señalan que la retroalimentación inmediata en entornos virtuales estimula la motivación intrínseca del estudiante, favoreciendo un aprendizaje autodirigido al vincular la teoría con la práctica en un espacio controlado e inocuo ante pérdidas de capital real.

En el ámbito administrativo y de gestión empresarial, la plataforma facilita la integración de áreas funcionales (finanzas, operaciones, recursos, entre otros). Esta visión sistémica promueve el desarrollo de competencias transversales —como el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la toma de decisiones bajo incertidumbre—, alineándose con la clasificación de resultados de aprendizaje de Faisal et al. (2022), la cual comprende la adquisición de conocimientos, el fortalecimiento de habilidades intelectuales e interactivas y la adopción de comportamientos gerenciales estratégicos.

Desde el punto de vista técnico, la adopción de una metodología evolutiva con enfoque iterativo e incremental (Sommerville, 2011; Pressman & Maxim, 2021) resultó clave para la madurez del sistema, permitiendo la detección temprana de ajustes mediante entregas parciales. La especificación rigurosa de requisitos bajo el estándar IEEE 830 (IEEE, 1998) y el modelado conceptual con UML (Muller, 1997) aseguraron la trazabilidad entre las necesidades de los usuarios y la estructura final de la base de datos relacional.

Asimismo, la arquitectura del software sigue los esquemas de alto nivel recomendados para entornos de simulación educativa (Borrajo et al., 2010), fundamentándose en el patrón Modelo-Vista-Controlador (MVC) mediante el marco de trabajo Laravel (Stauffer, 2019). Esta distribución facilitó la separación de responsabilidades y la modularidad del código backend en PHP (PHP, 2024). En la capa frontend, la combinación de Bootstrap (Spurlock, 2013) con scripts de JavaScript (Flanagan, 2020) y peticiones asíncronas vía AJAX demostró ser un acierto de diseño computacional, ya que permite el cómputo dinámico de indicadores y escenarios de mercado en tiempo real sin recargar la página. Finalmente, el sistema de gestión de bases de datos MySQL (MySQL, 2025) garantizó el cumplimiento de las propiedades ACID y la integridad referencial, asegurando un desempeño estable y eficiente en la infraestructura del servidor de producción institucional (HP ProLiant DL380 Gen9).

Por último, la dimensión de Configuración operativa (82.0%), aunque altamente positiva, representa el área con mayor oportunidad de optimización. Analizar este resultado a la luz de lo expuesto por Hernández-Lara et al. (2019) sugiere la conveniencia de implementar técnicas de analítica del aprendizaje (learning analytics) en el backend. Registrar las interacciones y patrones de modificación de datos durante el alta de insumos permitirá diagnosticar puntos de fricción operativa y comprender la lógica de toma de decisiones del alumnado. Como enfatizan Faisal et al. (2022), la solidez técnica del sistema y la disponibilidad de la tecnología cobran su verdadero valor cuando se articulan con una adecuada mediación pedagógica, actividades estructuradas y mecanismos rigurosos de evaluación longitudinal.

IV. CONCLUSIONES

Con la implementación y el desarrollo del simulador web de negocios se permitió poner a disposición una herramienta tecnológica orientada a fortalecer el proceso de enseñanza-aprendizaje del emprendimiento a través de la integración de actividades prácticas en un entorno virtual. Dicha plataforma proporciona a los estudiantes un espacio controlado para experimentar en contextos empresariales reales, con la creación y gestión de emprendimientos, aplicar conocimientos relacionados con la administración empresarial y explorar diferentes escenarios para la toma de decisiones, reduciendo los riesgos.

Los resultados obtenidos en la evaluación de usabilidad muestran un nivel de aceptación favorable por parte de los usuarios, con una valoración general del **84% (4.20 ± 0.53; n = 20)**. Entre las características identificadas más relevantes se encuentra la generación automatizada del reporte ejecutivo, facilitando la organización y presentación de la información generada durante la simulación lo cual contribuye a agilizar el análisis de los resultados

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID050

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Técnicamente, las pruebas funcionales realizadas permitieron verificar el funcionamiento de los principales componentes del sistema y establecer las condiciones necesarias para su implementación en el servidor institucional. Esta plataforma esta diseñada para su utilización en un entorno educativo, aunque su operación requiere actividades permanentes de administración, monitoreo, respaldo y mantenimiento para garantizar su disponibilidad, seguridad y continuidad del servicio.

V. AGRADECIMIENTOS

Nuestro sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron al éxito del desarrollo de este proyecto. En particular, reconocemos al Dr. Jesús Alejandro Valdés Nieblas, Subdirector de Posgrado e Investigación del ITSL, por su valioso apoyo y acompañamiento durante las actividades del proyecto. Asimismo, agradecemos a los colaboradores por su orientación, conocimientos y aportaciones, las cuales fueron fundamentales para la realización de este trabajo. De igual manera, expresamos nuestro reconocimiento al Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, por brindar el entorno académico e institucional adecuado para el desarrollo de esta investigación, así como por su infraestructura, recursos y comunidad académica. Finalmente, agradecemos a los estudiantes participantes por su dedicación, compromiso y participación activa, cuyo esfuerzo y creatividad fueron esenciales para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

VI. REFERENCIAS

Borrajo, M. L., Bueno, Y., de la Fuente, D., Lozano, J., & Montes, M. (2010). *High-level architecture for business simulators in education.* Computers & Education, 55(*1*), 322–330. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.01.018

Buil, I., Catalán, S., & Martínez, E. (2019). Encouraging intrinsic motivation in management training: The use of business simulation games. The International Journal of Management Education, 17(2), 162–171. https://doi.org/10.1016/j.ijme.2019.02.002

Chacon, S., & Straub, B. (2014). Pro Git (2.ª ed.). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-0076-6

Faisal, N., Chadhar, M., Goriss-Hunter, A., & Stranieri, A. (2022). Business simulation games in higher education: A systematic review of empirical research. Human Behavior and Emerging Technologies, 2022, Article 1578791. https://doi.org/10.1155/2022/1578791

Faria, A. J., Hutchinson, D., Wellington, W. J., & Gold, S. (2009). Developments in business gaming: A review of the past 40 years. Simulation & Gaming, 40(4), 464–494. https://doi.org/10.1177/1046878109333863

Flanagan, D. (2020). JavaScript: The definitive guide (7.ª ed.). O'Reilly Media.

Goi, C. L. (2019). The use of business simulation games in teaching and learning. Journal of Education for Business, 94(5), 342–349. https://doi.org/10.1080/08832323.2018.1536028

Hernández-Lara, A. B., Perera-Lluna, A., & Serradell-López, E. (2019). Applying learning analytics to students' interaction in business simulation games: The usefulness of learning analytics to know what students really learn. Computers in Human Behavior, 92, 600–612. https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.03.001

IEEE. (1998). IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications (IEEE Std 830-1998). IEEE Computer Society. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1998.88286

Microsoft. (2024). Visual Studio Code. https://code.visualstudio.com/

Misseyanni, A., Lytras, M. D., Papadopoulou, P., & Marouli, C. (Eds.). (2018). Active learning strategies in higher education: Teaching for leadership, innovation, and creativity. Emerald Publishing.

Muller, P.-A. (1997). Modelado de objetos con UML. Gestión 2000.

MySQL. (2025). MySQL Workbench. https://www.mysql.com/products/workbench/

Olguin-Villalobos, L. R., Ventura-Aguilar, H. E., Zavaleta-López, M. C., & Moncada-Torres, L. D. (2026). Uso de simuladores de negocios en la enseñanza de la economía y la administración: tipos, características y su impacto en el aprendizaje universitario. Multidisciplinary Latin American Journal (MLAJ), 4(1), 267–279. https://doi.org/10.62131/MLAJ-V4-N1-018

PHP. (2024). ¿Qué es PHP? Manual de PHP. https://www.php.net/manual/es/intro-whatis.php

phpMyAdmin. (2024). phpMyAdmin documentation. https://www.phpmyadmin.net/docs/

Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2021). Ingeniería del software: Un enfoque práctico (9.ª ed.). McGraw-Hill.

Sommerville, I. (2011). Ingeniería de software (9.ª ed.). Pearson Educación.

Spurlock, J. (2013). Bootstrap: Responsive web development. O'Reilly Media.

Stauffer, M. (2019). Laravel: Up & running: A framework for building modern PHP apps (2.ª ed.). O'Reilly Media.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización	*Rocio Lorena Rodriguez Chacon, Rosa María Morales Flores*
2	Curación de datos	*Francisco Eduardo Rodríguez Campos*
3	Análisis formal	*Diana Sarahi Morales Venegas, Rocio Lorena Rodriguez Chacon, Rosa María Morales Flores,*
4	Obtención de fondos	*N/A*
5	Investigación	*Irma Tinoco Alcázar*
6	Metodología	*Diana Sarahi Morales Venegas, Rocio Lorena Rodriguez Chacon,*
7	Administración del proyecto	*Irma Tinoco Alcázar*
8	Recursos	*N/A*
9	Software	*Diana Sarahi Morales Venegas, Rocio Lorena Rodriguez Chacon, Francisco Eduardo Rodríguez Campos*
10	Supervisión	*Irma Tinoco Alcázar*
11	Validación	*Rocio Lorena Rodriguez Chacon, Fancisco Eduardo Rodríguez Campos*
12	Visualización	*Diana Sarahi Morales Venegas*
13	Redacción - borrador original	*Diana Sarahi Morales Venegas*
14	Redacción - revisión y edición	*Rocio Lorena Rodriguez Chacon, Rosa María Morales Flores, Francisco Eduardo Rodríguez Campos*

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID050

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Implementación de Buenas Prácticas de Manufactura y Gestión de Indicadores en la Industria del Diseño y Empaque

Implementation of Good Manufacturing Practices and Management of Indicators in the Design and Packaging Industry

Gaucin-Delgado, A.[1]; Morales-Flores, R.M.[2]; Flores-Rivas, S.M.[3]; Fong-Alvarado, M.[4]

Datos de Adscripción:

[1] Gaucin Delgado, Alejandra
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
alejandra.gd@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4120-8137

[2] Morales Flores, Rosa María
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
rosa.mf@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7943-3408

[3] Flores Rivas, Sulma Mónica
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
sulma.fr@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6363-167X

[4] Fong Alvarado, Mayela
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
fongmayela@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9050-090X

Resumen: **El estudio tuvo como objetivo incrementar el cumplimiento de indicadores operativos en una empresa del sector de diseño y empaque. Para lograr esto, se implementó el ciclo Planear, Hacer, Verificar y Actuar. Esta investigación se centró principalmente en las áreas de producción y almacenamiento, ya que presentaban áreas de oportunidad iniciales en higiene, orden y control de plagas, que afectaban la calidad. Se utilizó una metodología de tipo cuasi-experimental que integró diagnósticos, inspecciones periódicas y la capacitación de los trabajadores. Asimismo, se implementó la metodología de los cinco ejes, así como diagramas de causa y efecto para disminuir áreas de oportunidad operativas de manera sistemática. Los resultados demostraron una mejora considerable en los indicadores en estudio, los cuales son: el cumplimiento en higiene y sanidad aumentó del 60% al 98.95%, mientras que el área de producto terminado alcanzó el 99% de los estándares establecidos. En conclusión, este avance optimizó la eficiencia de los procesos y estableció las bases para obtener certificaciones de seguridad alimentaria, mejorando la competitividad de la organización.**

Palabras clave: Buenas prácticas de manufactura, Calidad, Inocuidad, Mejora continua, Sector de diseño y empaque.

Abstract: **This study aimed to increase compliance with operational indicators in a company in the design and packaging sector. To achieve this, the Plan-Do-Check-Act cycle was implemented. This research focused primarily on the production and storage areas, as they presented initial areas for improvement in hygiene, order, and pest control, which were impacting quality. A quasi-experimental methodology was used, integrating diagnostics, periodic inspections, and employee training. The five-axis methodology was also implemented, along with cause-and-effect diagrams, to systematically reduce operational areas for improvement. The results demonstrated a considerable improvement in the indicators studied: compliance with hygiene and sanitation increased from 60% to 98.95%, while the finished product area reached 99% of the established standards. In conclusion, this progress optimized process efficiency and laid the groundwork for obtaining food safety certifications, improving the organization's competitiveness.**

Keywords: Continuous improvement, Design and packaging sector, Good manufacturing practices, Quality.

I. INTRODUCCIÓN

La adopción de estándares de calidad y seguridad industrial es un requisito indispensable para las organizaciones y su creciente competitividad y sostenibilidad. Las Buenas Prácticas de Manufactura representan el fundamento técnico para asegurar que los productos que se elaboren contengan las condiciones, protocolos y responsabilidad sanitaria óptimos, y así mitigar los riesgos de contaminación y garantizar la inocuidad en el área de trabajo.

Investigaciones previas destacan que la implementación de estas prácticas suele enfrentar retos significativos en la incorporación de los sistemas de gestión y en esta investigación no fue la excepción. Según Cárdenas Aristizábal (2019), se identifica que en sectores altamente regulados existe una débil articulación entre la gestión de calidad, el riesgo y el conocimiento, proponiendo el ciclo Planear-Hacer-Verificar-Actuar, como el eje estructurante para elevar el cumplimiento normativo en los procesos.

Por otro lado, Gómez Hoyos, V. (2025), en una evaluación que se realizó en una planta de derivados cárnicos, sustenta que la correcta implementación de buenas prácticas de manufactura no

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID059

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

solo asegura la inocuidad, sino que también optimiza los procesos. A diferencia de las investigaciones que se acaban de mencionar, que se concentran mayoritariamente en los sectores gastronómico, comercial o de alimentos procesados, el presente estudio se particulariza al abordar el nicho del diseño y los empaques de manera interventora (Díaz Ortega *et al*. 2021). Además, dada una necesidad de control preventivo estricto es respaldada por Alvarado (2024), quienes han demostrado que la implementación sistemática de las Buenas Prácticas de Manufactura ha influido de una forma directa y positiva en la madurez de los sistemas de gestión de la calidad en las organizaciones, y así reduciendo reprocesos y mermas económicas. Arellano-Narváez (2020) y Albuja (2021) abordan que la trascendencia de la inocuidad alimentaria se centra primordialmente en establecimientos de servicios y consumo directo, resaltando que la ausencia de controles rigurosos y diagnósticos iniciales de línea base expone a las organizaciones a fallos generalizados en el cumplimiento de normativas sanitarias actualmente vigentes.

El presente trabajo se sitúa en el sector de diseño y empaque, y aunque cuenta con certificaciones de calidad como la ISO 9001:2015, presenta áreas de oportunidad en la transición hacia estándares de inocuidad superiores como la ISO 22000:2018. Por tal motivo, el objetivo del trabajo fue implementar las Buenas Prácticas de Manufactura e incrementar el porcentaje de cumplimiento de los indicadores mediante el ciclo Planear-Hacer-Verificar-Actuar.

Se identificó en la Planta 3 de la empresa, en una empresa de diseño y empaque, ausencia de una implementación estandarizada y continua de las Buenas Prácticas de Manufactura, lo que derivó en unas deficiencias críticas de higiene personal, desorden en el almacenamiento y falta de disciplina operativa en la organización de diseño y empaque. Específicamente, se detectaron incumplimientos recurrentes en el uso de indumentaria de protección (cofias) y fallas en la gestión de inventarios bajo el método de Primera Entradas, Primeras Salidas. Para diagnosticar estas causas raíz, se emplearon herramientas como el diagrama de Ishikawa y el método de las 6M, fundamentados teóricamente por Gutiérrez Pulido y De la Vara Salazar (2013), los cuales permiten una visión integral de los factores de variabilidad en la manufactura. Asimismo, durante la etapa de ejecución, se llevaron a cabo acciones estratégicas que incluyeron programas de capacitación formal para el personal operativo, siguiendo el esquema de capacitación en planta propuesto por Hernández (2022).

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

En respuesta a estas problemáticas, este artículo desarrolla la aplicación sistemática del ciclo Planear-Hacer-Verificar-Actuar. La intervención, bajo un enfoque cuasi-experimental, integró diagnósticos iniciales, capacitaciones al personal y la estandarización de Procedimientos Operativos Estandarizados de Saneamiento. Como señala Cepeda López, M.I. (2025), la fase de estandarización es crucial para formalizar los logros alcanzados y convertirlos en rutinas institucionales que fomenten una cultura de mejora continua. El trabajo concluye con una evaluación de los resultados obtenidos, demostrando cómo la metodología aplicada no solo elevó los indicadores de cumplimiento, sino que fortaleció la infraestructura técnica para futuras certificaciones de seguridad alimentaria.

2.1 Ciclo PHVA

Fase 1 Planear

Se establecieron las bases del proyecto, alineando las actividades con los objetivos planteados. El propósito fue contar con un diagnóstico claro que permitiera diseñar estrategias enfocadas en la implementación de las Buenas Prácticas de Manufactura.

Diagnóstico inicial en las áreas seleccionadas, para identificar fortalezas y áreas de oportunidad, observando así las deficiencias en orden, limpieza y control en las áreas de Producción y almacenes, lo cual fue una gran área de oportunidad para poder implementar una solución en la figura 1 se muestra las áreas en estudio son producción, almacén Materia Prima y almacén Producto Terminado, para la implementación del proyecto, en este formato se agregaron las áreas, el criterio a evaluar que en este caso son las Buenas Prácticas de Manufactura y la metodología 5´S, así como si cumplen, no cumplen o no aplica en el área y finalmente, las observaciones que se hicieron en el recorrido.

Figura 1.
Formato de diagnóstico aplicado

Área evaluada	Criterio	Cumple (Si/No)	Observaciones
Producción	Buenas Prácticas de Higiene y Sanidad	No	Se observó a personas que no portaban la cofia ni zapatos de seguridad.
	Buenas Prácticas de Almacenamiento	N/A	N/A
	Control de Plagas	No	Si cuenta con control de plagas pero no están monitoreados por el proveedor externo.
	Metodología 5´S	No	No llevan a cabo la metodología 5´S.
Almacén MP	Buenas Prácticas de Higiene y Sanidad	Si	El personal si cumple con los lineamientos.
	Buenas Prácticas de Almacenamiento	No	Se observó que no cumplen con todos los lineamientos, como obstrucción de pasillo, PEPS, etc.
	Control de Plagas	No	Si cuenta con control de plagas pero no están monitoreados por el proveedor externo.
	Metodología 5´S	No	No llevan a cabo la metodología 5´S.
Almacén PT	Buenas Prácticas de Higiene y Sanidad	Si	El personal si cumple con los lineamientos.
	Buenas Prácticas de Almacenamiento	No	Se observó que no cumplen con todos los lineamientos, como obstrucción de pasillo, PEPS, etc.
	Control de Plagas	No	Si cuenta con control de plagas pero no están monitoreados por el proveedor externo.
	Metodología 5´S	No	No llevan a cabo la metodología 5´S.

En la figura 2 se muestra un ejemplo de evidencia de inspección de Buenas Prácticas de Manufactura sólo del área de producción, Almacén de Materia Prima, Almacén de Producto Terminado, donde se aplicaron formatos de inspección para evaluar las áreas.

Fase 2 Hacer

En la figura 3 se muestra la planeación para ejecutar el programa de las 5S, así como las inspecciones que se llevarán a cabo cada mes. Este registro permite dar seguimiento desde la capacitación hasta la evaluación del plan, garantizando la mejora continua. Se agregaron las actividades para la fase Hacer, que incluyeron la aplicación de las 5S, las inspecciones periódicas y las capacitaciones al personal, así como los responsables de cada actividad. Los resultados de este plan de trabajo se presentarán más adelante en la Fase Verificar.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID059

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 2.
Evidencia inspección de Buenas Prácticas de Manufactura

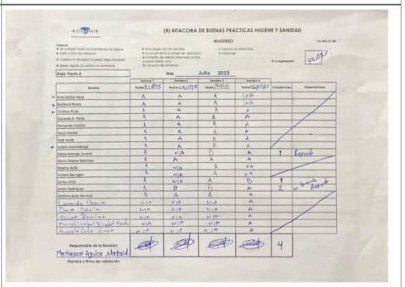
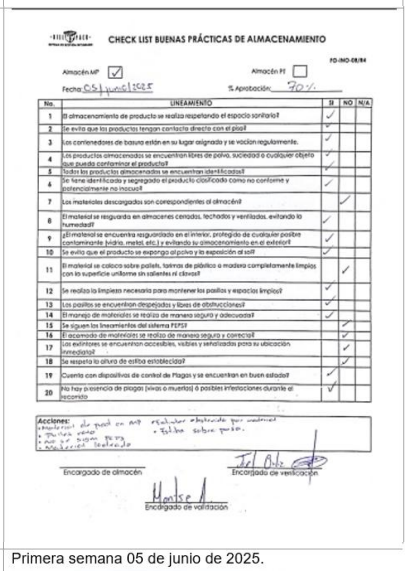
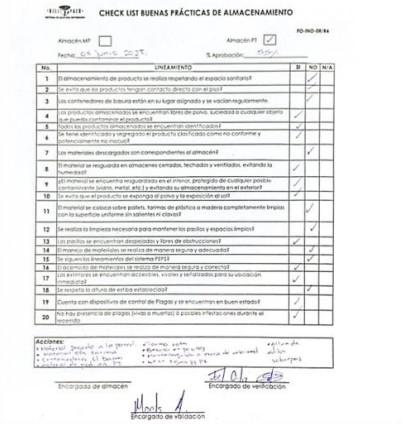
Inspección	Porcentaje de cumplimiento	Evidencia
Buenas Prácticas de Higiene y Sanidad	**Producción** 70.44%	
Incidencias de Inocuidad	**Producción** 13 incidencias de inocuidad	7 incidencias de inocuidad por no portar la cofia. 3 incidencias de inocuidad por uso de maquillaje en áreas de producción. 2 incidencias de inocuidad por portar las uñas largas. 1 incidencia de inocuidad por portación de objetos personales en áreas de producción.
Buenas Prácticas de Almacenamiento	**Almacén MP** 73.75%	
	Almacén PT 71.25%	Primera semana 05 de junio de 2025. 

Figura 3.
Plan de trabajo y aplicación de 5's

Etapa / Actividad	Responsable(s)	Evidencias
Capacitación sobre 5S y BPM´s	Practicante SGI	Lista de asistencia, presentaciones, fotos de las sesiones.
Diseño de formato para 5´S	Practicante SGI	Formato.
Aplicación de Seiri (Clasificar)	Personal de cada área / Practicante SGI	Registro de materiales retirados, área despejada.
Aplicación de Seiton (Ordenar)	Personal de cada área / Practicante SGI	Señalización, etiquetado y ubicación definida de herramientas.
Aplicación de Seiso (Limpiar)	Personal de cada área / SGI	Bitácora de limpieza diaria, evidencias fotográficas.
Aplicación de Seiketsu (Estandarizar)	Personal de cada área / Practicante SGI	Procedimientos escritos, checklists, normas visuales.
Aplicación de Shitsuke (Disciplina)	Practicante SGI / Supervisores	Auditorías mensuales, reportes de cumplimiento.
Inicio de inspecciones periódicas mensuales	Practicante SGI / Inocuidad	Formatos de inspección, reportes con hallazgos y acciones.

Fase 3 Verificar

Se revisaron los resultados obtenidos para comparar el desempeño real con los indicadores establecidos y verificar la efectividad de las acciones implementadas. Los porcentajes de cumplimiento en inspecciones consistieron en la elaboración de un concentrado de los porcentajes de cumplimiento obtenidos en las distintas inspecciones realizadas durante el periodo evaluado.

Porcentaje de cumplimiento de Área de Producción

Este concentrado permite reunir en un solo documento toda la información generada en las revisiones operativas, facilitando el análisis del desempeño general y la identificación de tendencias, desviaciones o áreas de oportunidad. Al integrar los resultados de manera sistematizada, se fortalece el proceso de verificación y se proporciona fundamento para la toma de decisiones y el desarrollo de una implementación que conlleva a acciones de mejora dentro de la planta, en la figura 4 se muestra el concentrado de porcentajes de cumplimiento de Buenas Prácticas de Higiene y Sanidad e Incidencias de Inocuidad, presentando el seguimiento semanal y mensual correspondientes a los meses de junio - octubre del 2025.

En cada periodo se evalúan dos áreas principales: Administrativos y Producción, en este caso, sólo se tomaron los datos del área de Producción, considerando el porcentaje de cumplimiento semanal y el cálculo del promedio mensual para determinar el desempeño general de cada mes. Este análisis permite identificar tendencias, desviaciones y el impacto de los hallazgos en el cumplimiento global.

Figura 4.
Concentrado de % de cumplimiento de buenas prácticas de higiene y sanidad área producción

% DE CUMPLIMIENTO A LAS BUENAS PRÁCTICAS DE MANUFACTURA

META MENSUAL 80%

	JUNIO				JULIO			
	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4
Administrativo					100%	100%	100%	100%
Producción					100%	85.71%	81.81%	92.85%
SEMANAL	0%	0%	0%	0%	100%	92.88%	90.91%	96.43%
%CUMPLIMIENTO MENSUAL	70.44%				96.05%			

% DE CUMPLIMIENTO A LAS BUENAS PRÁCTICAS DE MANUFACTURA

META MENSUAL 80%

	AGOSTO				SEPTIEMBRE				OCTUBRE			
	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4
Administrativo	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	95%
Producción	100%	93.10%	96.55%	100.00%	90.90%	85.71%	88.23%	92.85%	96.56%	100%	100%	100%
SEMANAL	100%	96.55%	98.28%	100%	95.45%	92.88%	94.12%	96.43%	98.48%	100%	100%	100%
%CUMPLIMIENTO MENSUAL	96.71%				94.52%				90.35%			

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID059

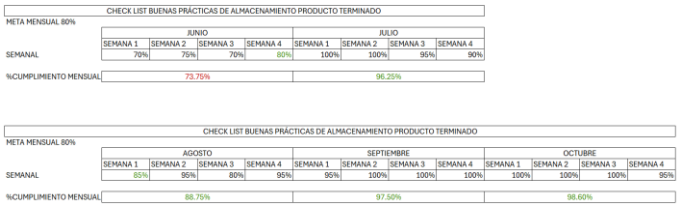
This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Este documento sirve como herramienta clave dentro de la fase de Verificación del ciclo Planear-Hacer-Verificar-Actuar, ya que permite comparar los resultados obtenidos con la meta establecida del 80% mensual, evaluar el desempeño operativo y sustentar la toma de decisiones.

Porcentaje de cumplimiento de Almacén Materia Prima

En el siguiente Concentrado de porcentajes de cumplimiento de Buenas Prácticas de Almacenamiento de Materia Prima presentando una evaluación detallada del cumplimiento semanal y mensual de 20 criterios fundamentales para asegurar el orden, la limpieza, la correcta estiba, la segregación, la protección del material, la aplicación del sistema Primera Entradas, Primeras Salidas, la accesibilidad de extintores, el mantenimiento de pasillos despejados y el Control de Plagas dentro del Almacén de Materia Prima, en la tabla 5 se menciona que a lo largo del periodo evaluado de junio a octubre se observa una evolución significativa en el nivel de cumplimiento, junio inicia con un 73.75%, reflejando diversas áreas críticas como materiales mal acomodados, falta de limpieza profunda o deficiencias en la protección del producto; sin embargo, a partir de julio se evidencia una mejora notable con un 93.25%, seguida por un desempeño estable en agosto con 88.75%, lo que demuestra que las acciones correctivas comenzaron a consolidarse. En septiembre y octubre, los resultados alcanzan 97.50% y 98.60% respectivamente, evidenciando no solo la efectividad de las medidas implementadas, sino también la disciplina operativa del personal para mantener prácticas adecuadas de inocuidad y orden.

Figura 5.
Concentrado de % de cumplimiento de buenas prácticas de higiene y sanidad área almacén producto terminado.



CHECK LIST BUENAS PRÁCTICAS DE ALMACENAMIENTO PRODUCTO TERMINADO

META MENSUAL 80%

	JUNIO				JULIO			
SEMANAL	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4
	70%	75%	70%	80%	100%	100%	95%	90%
%CUMPLIMIENTO MENSUAL	73.75%				96.25%			

CHECK LIST BUENAS PRÁCTICAS DE ALMACENAMIENTO PRODUCTO TERMINADO

META MENSUAL 80%

	AGOSTO				SEPTIEMBRE				OCTUBRE			
SEMANAL	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4
	85%	95%	80%	95%	95%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	96%
%CUMPLIMIENTO MENSUAL	88.75%				97.50%				98.60%			

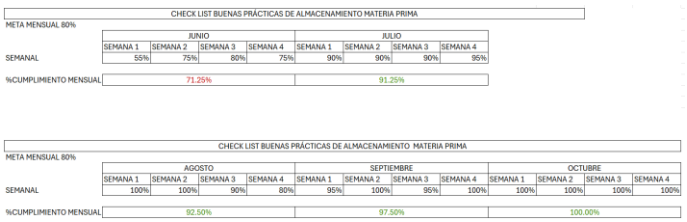
El concentrado refleja una tendencia claramente ascendente y sostenida, mostrando cómo el almacén fortaleció su cumplimiento hasta estabilizarse por encima del estándar requerido del 80%, logrando una operación más segura, organizada y alineada con los lineamientos de buenas prácticas establecidos.

Porcentaje de cumplimiento de Almacén Producto Terminado

El concentrado de porcentajes de Buenas Prácticas de Almacenamiento del Almacén de Producto Terminado en la Tabla 5 muestra una evaluación continua del cumplimiento semanal y mensual de diversos criterios relacionados con la correcta organización, identificación, protección, limpieza, estiba, control de plagas, manejo de materiales y aplicación de lineamientos operativos dentro del área. En este registro, que abarca los meses de junio a octubre, se observa que las actividades de verificación incluyen puntos esenciales como evitar el contacto directo del producto con el piso o la pared, mantener pasillos despejados, verificar que los materiales estén protegidos de contaminantes, confirmar la limpieza adecuada de las áreas, validar el uso del sistema Primera Entradas, Primeras Salidas, asegurar la disponibilidad de extintores y garantizar que no existan indicios de plagas.

A lo largo del periodo evaluado, los resultados semanales muestran una tendencia de cumplimiento mayormente alta, con valores frecuentes del 100%, lo que refleja que las condiciones del almacén se mantienen bajo control y que el personal aplica consistentemente los procedimientos establecidos. Los promedios mensuales evidencian una operación estable, con porcentajes que se mantienen por encima de la meta del 80%, lo cual confirma que las prácticas de almacenamiento en el área de Producto Terminado se ejecutan de manera adecuada y sostenida.

Figura 6.
Concentrado de % de cumplimiento de buenas prácticas de higiene y sanidad área almacén materia prima



CHECK LIST BUENAS PRÁCTICAS DE ALMACENAMIENTO MATERIA PRIMA

META MENSUAL 80%

	JUNIO				JULIO			
SEMANAL	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4
	55%	75%	80%	75%	90%	90%	90%	95%
%CUMPLIMIENTO MENSUAL	71.25%				91.25%			

CHECK LIST BUENAS PRÁCTICAS DE ALMACENAMIENTO MATERIA PRIMA

META MENSUAL 80%

	AGOSTO				SEPTIEMBRE				OCTUBRE			
SEMANAL	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4
	100%	100%	90%	80%	95%	100%	95%	100%	100%	100%	100%	100%
%CUMPLIMIENTO MENSUAL	92.50%				97.50%				100.00%			

En conjunto en la figura 6 demuestra que el almacén ha logrado consolidar un nivel de cumplimiento favorable, manteniendo la integridad del producto final, reduciendo riesgos de contaminación o daño físico y fortaleciendo la inocuidad y seguridad de las operaciones conforme a los estándares establecidos.

Fase 4 Actuar

Diseño de estrategias y acciones correctivas, en esta fase se consolidaron las mejoras alcanzadas, corrigiendo desviaciones detectadas y formalizando las acciones necesarias para asegurar la continuidad y el fortalecimiento del desempeño obtenido. Con el propósito de dar cumplimiento a la Fase 4 Actuar del ciclo Planear-Hacer-Verificar-Actuar, se elaboró una matriz de estrategias y acciones correctivas orientadas a atender los incumplimientos detectados en las inspecciones de Buenas Prácticas de Manufactura, Higiene y Sanidad, Almacenamiento de Materia Prima y Producto Terminado

En la Figura 7 se muestra un plan de acción estructurado que facilite la mejora continua y asegure que las áreas operativas mantengan niveles de cumplimiento iguales o superiores al 80%, considerado como el mínimo aceptable dentro de los estándares internos de la planta.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID059

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 7.
Estrategias y acciones correctivas

Buenas Prácticas de Manufactura	Estrategias	Acciones correctivas
Buenas Prácticas de Higiene y Sanidad	• Realizar charlas cortas semanales sobre requisitos de presentación personal. • Asignar un responsable por turno encargado de verificar la presentación personal antes de ingresar al área productiva.	• Registrar al operario que no cumpla y enviarlo a corregir. • Reponer cofias, cubrebocas cuando falten o estén en mal estado. • Reentrenar individualmente al personal reincidente y de ser necesario, aplicar medidas disciplinarias conforme al reglamento.
Buenas Prácticas de Almacenamiento MP Y PT	• Reforzar el orden y la correcta estiba mediante la estandarización de alturas, distancias y pasillos libres. • Realizar verificaciones diarias del cumplimiento de PEPS y segregación.	• Reacomodar de inmediato el material mal estibado o colocado en zonas incorrectas. • Retirar materiales dañados, sin identificación o colocados fuera de normativa.

Representando así para cada categoría, un conjunto de estrategias preventivas, enfocadas en reducir la recurrencia de desviaciones mediante capacitaciones, reforzamiento visual, supervisión continua y revisión de procedimientos.

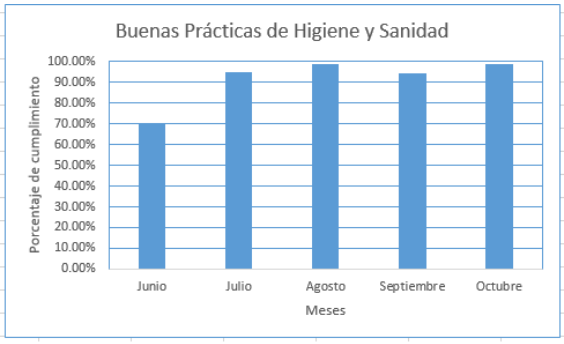
Asimismo, se incluyen acciones correctivas inmediatas, diseñadas para aplicarse en cuanto se detecte un incumplimiento, tales como reacomodo de materiales, corrección de la presentación del personal, generación de reportes, limpieza extraordinaria o reentrenamiento individual.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Buenas Prácticas de Higiene y Seguridad área de Producción

En la figura 8, se muestra el grado de cumplimiento respecto a los procedimientos establecidos para asegurar condiciones adecuadas de limpieza, desinfección y control sanitario.

Figura 8.
Buenas prácticas de higiene y sanidad



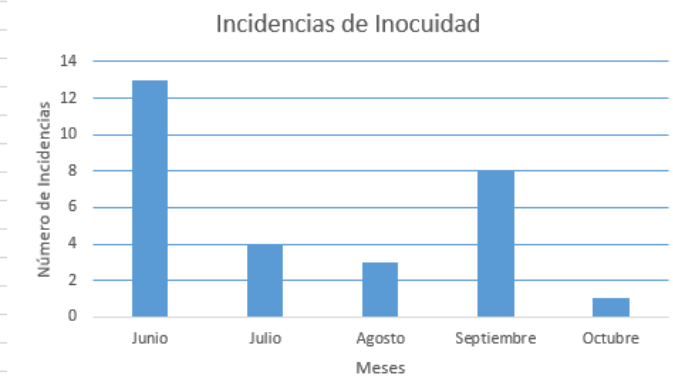
Es posible identificar un incremento notable después de junio, alcanzando valores que se mantienen cercanos o superiores al 95% durante los meses restantes. La representación evidencia una mejoría continua en la aplicación de prácticas de limpieza y sanidad, reflejo de una mayor disciplina operativa y control de las actividades inspeccionadas. El comportamiento ascendente que se observa en julio, agosto y octubre confirma que las acciones implementadas contribuyeron a fortalecer los procedimientos internos para garantizar condiciones higiénicas dentro del área evaluada.

3.2 Incidencias de Inocuidad

Este registro permite reconocer periodos con mayor exposición al riesgo y valorar la efectividad de las medidas preventivas implementadas. El mes de junio destaca por presentar la cifra más alta con 13 incidentes, lo que evidencia un inicio con diversas áreas de oportunidad. A partir de julio, los valores disminuyen de manera importante, registrándose posteriormente cantidades menores, hasta llegar a 1 incidente en octubre, considerado el nivel mínimo dentro del periodo evaluado.

En la Figura 9, se muestra con claridad la variación en el número de incidencias. El dato correspondiente a junio muestra un nivel significativamente mayor respecto a los meses siguientes. A partir de julio, se advierte una tendencia a la baja con pequeñas fluctuaciones, presentando un ligero repunte en septiembre antes de descender nuevamente en octubre, donde se alcanza el valor más bajo registrado. Este comportamiento sugiere que las medidas adoptadas tras los primeros hallazgos favorecieron una reducción progresiva de las desviaciones asociadas a la inocuidad, fortaleciendo el control de riesgos en los procesos.

Figura 9.
Incidencia de inocuidad



3.3 Buenas Prácticas de Almacenamiento Almacén Materia Prima

Se registraron los porcentajes mensuales correspondientes al periodo de junio a octubre. Estos resultados permiten identificar el grado de apego a los lineamientos establecidos para el manejo, orden, higiene y conservación adecuada de la Materia Prima, aspectos fundamentales donde se garantiza la inocuidad y también la calidad de los productos. Se observa un incremento

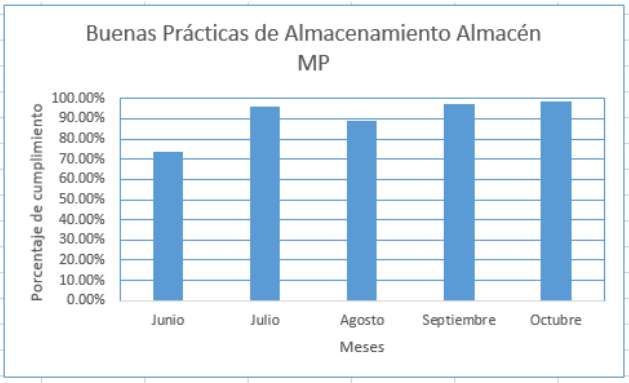
Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID059

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

progresivo en el cumplimiento de las buenas prácticas, iniciando en 73.75% durante junio y alcanzando valores superiores al 96% en los meses posteriores. El porcentaje más alto registrado corresponde a octubre con 98.60%, evidenciando una mejora continua en la gestión del Almacén de Materia Prima.

La figura 10, muestra de manera visual los porcentajes de cumplimiento de junio a octubre. La tendencia general es positiva y ascendente, destacando una mejora significativa después del mes de junio. Durante julio y septiembre se registran valores superiores al 96%, mientras que octubre refleja el mayor nivel de cumplimiento con 98.60%, consolidando un adecuado control en las prácticas de almacenamiento.

Figura 10.
Buenas prácticas de almacenamiento almacén materia prima

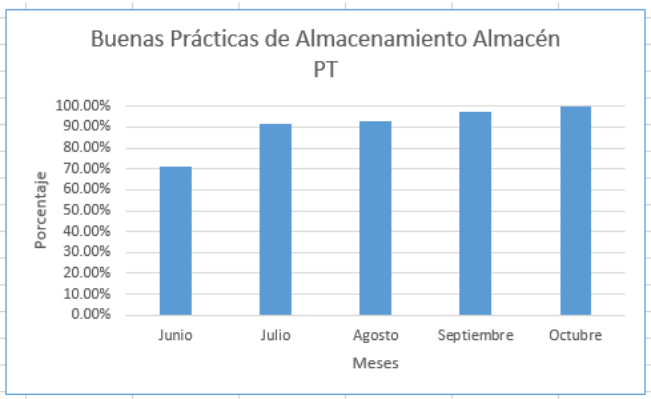


3.4 Buenas Prácticas de Almacenamiento Almacén Producto Terminado

El presente apartado muestra el seguimiento del porcentaje de cumplimiento relacionado con las Buenas Prácticas de Almacenamiento en el área de Producto Terminado durante los meses de junio a octubre, permitiendo visualizar el comportamiento y la mejora continua en las actividades operativas del almacén, identificando avances significativos derivados de la implementación de acciones correctivas y preventivas. Se inicia en junio con un 71.25% y muestra una tendencia ascendente a lo largo del periodo. Se observa una mejora continua, alcanzando un 100% de cumplimiento para el mes de octubre.

En la Figura 11 se muestra, el porcentaje de cumplimiento de las Buenas Prácticas de Almacenamiento en el área de Producto Terminado durante los meses de junio a octubre. En junio se observa un cumplimiento del 71.25%, seguido de un incremento notable en julio con 91.25%. Para agosto, el cumplimiento continúa aumentando a 92.50%, mientras que en septiembre alcanza 97.50%. Finalmente, en octubre se logra el 100%, reflejando una mejora continua y sostenida en el cumplimiento de los estándares establecidos. Esta representación visual permite comparar fácilmente la evolución mensual y resalta el progreso logrado en el periodo evaluado.

Figura 11.
Buenas prácticas de almacenamiento almacén producto terminado



IV. CONCLUSIONES

El desarrollo del proyecto ha permitido comprobar que la aplicación de la metodología del ciclo Planear-Hacer-Verificar-Actuar es muy efectiva y que ya se han mejorado progresivamente las condiciones operativas en la organización. En el diagnóstico inicial, se identificaron las causas principales de lo siguiente: deficiencias en orden, limpieza e inocuidad, lo que facilitó el diseño de acciones preventivas y correctivas alineadas a las necesidades reales de la planta.

En las inspecciones periódicas que se realizaron y la capacitación del personal, se obtuvo un logró de incrementar de manera significativa los niveles de cumplimiento en las Buenas Prácticas de Manufactura.

Los resultados que se obtuvieron demostraron que las áreas que fueron evaluadas presentaron avances notables en los siguientes aspectos: el acomodo de materiales, la clasificación de residuos, el monitoreo de trampas, la limpieza de máquinas y el uso correcto de los lineamientos de higiene personal. También se detectó que la participación del personal aumentó gradualmente, lo que permitió consolidar el ambiente de trabajo con factores de seguridad y eficiencia.

La implementación de la fase Actuar permitió que las mejoras que se marcaron y se desarrollaron se integraran al funcionamiento habitual de la planta, aumentando la capacidad de mantener los resultados a largo plazo. La aplicación de la metodología PHVA cumplió con los objetivos planteados, fortaleció el Sistema de Gestión Integrado y dejó bases sólidas para que Planta 3 continúe avanzando hacia la mejora continua y futuras certificaciones relacionadas con la inocuidad y la calidad.

Para asegurar la continuidad y sostenibilidad de las mejoras implementadas en la organización, se ha recomendado mantener la utilización mensual en las inspecciones de Buenas Prácticas de Manufactura y así reforzar la comunicación de resultados

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID059

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

mediante tableros visuales colocados en áreas comunes. Esto permitirá que el personal de la organización conozca el desempeño en cada área y contribuya de manera activa a mantener los lineamientos establecidos por la organización.

Se considera conveniente que el área de Sistema de Gestión Integrado continúe con su trabajo de analizar los formatos de inspección conforme evolucionen los procesos (semanales y mensuales), con el fin de asegurar que estos reflejen las necesidades actuales de la operación en el momento y hacer las correcciones pertinentes. Asimismo, se recomienda fortalecer el programa de capacitación continua, que se implementen mejoras y actualizaciones de las necesidades actuales, especialmente en temas relacionados con higiene personal, control de plagas, manejo de materiales y organización del área, para evitar que las incidencias detectadas vuelvan a presentarse.

En los resultados que se obtuvieron en las inspecciones relacionadas con uno de los proveedores relativamente fueron bajos, sería recomendable evaluar su desempeño mediante registros históricos, niveles de servicio, respuesta ante desviaciones y cumplimiento de requisitos. En caso de que el proveedor no cumpla con los estándares necesarios, se podría considerar la opción de llevar a cabo un cambio de proveedor con el fin de mejorar la efectividad del servicio y garantizar mejores resultados en las inspecciones futuras.

Finalmente, se recomienda avanzar paso a paso, sin omitir secciones o procedimientos para que avance la automatización de registros y reportes, ya que esto facilitará el análisis de tendencias y permitirá una toma de decisiones más ágil y certera.

V. AGRADECIMIENTOS

Se desea manifestar una profunda gratitud a todas las personas que contribuyeron a la concreción de este trabajo de investigación y al apoyo brindado.
Se agradece al personal y a los propietarios de la empresa de la industria del diseño y empaque por su apoyo incondicional durante el proceso de esta investigación.
Se reconoce la participación de los expertos que revisaron y validaron los instrumentos aplicados, cuya experiencia enriqueció los resultados del estudio y fortaleció la calidad académica de la investigación.
Asimismo, se extiende un agradecimiento al Instituto Nacional de México y al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por su respaldo institucional y por brindar el espacio académico y formativo. El compromiso con la excelencia educativa y su constante impulso a la investigación aplicada hacen posible llevar a cabo casos de estudio con impacto real en el sector empresarial.
A todos los docentes, asesores y autoridades del Instituto que directa o indirectamente contribuyeron a este trabajo, se les agradece por su guía, su dedicación y por sembrar el valor del conocimiento como herramienta de transformación.

VI. REFERENCIAS

Albuja, P. A. (2021). Inocuidad de los alimentos expendidos en la vía pública: una revisión sistemática. *Perfiles*, 1(26), 34-47. https://dspace.espoch.edu.ec/items/f27e6899-0673-4ea6-85ee-cd9e1a460f55

Alvarado, J. S. (2024). *Propuesta para la implementación de buenas prácticas de manufactura (BPM)* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo]. Riobamba, Ecuador. https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd/es/article/view/1369

Arellano-Narváez, Y. (2020). Inocuidad y soberanía alimentaria en gastronomía tradicional del centro y Montaña de Guerrero: una revisión crítica. *Revista de Inocuidad y Cultura Alimentaria,* 42-45. https://doi.org/10.24836/es.v33i62.1337

Cárdenas Aristizábal, L. A. (2019). Integración de sistemas de gestión de calidad con las buenas prácticas de manufactura en tres empresas farmacéuticas de inyectables de Bogotá, D.C. 11, 131-153. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6990350

Cepeda López, M.I, (2025). *Metodología 5'S para el mejoramiento de la productividad de cepeda CIA,. LTDA.* [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador] Ambato, Ecuador. https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/7320da8e-261a-43de-8e29-c4d21c1a82b1/content

Cuatrecasas Arbós, L., & González Babón, J. (2017). *Gestión integral de la calidad: Implantación, control y certificación.* Profit Editorial.

Díaz Ortega, F., Espinales Canales, N. A., & López Palacios, O. A. (2021). *Propuesta para norma de inocuidad alimentaria para empaques primarios biodegradables* [Proyecto de investigación, Universidad Nacional]. https://ribuni.uni.edu.ni/5754/1/99744.pdf

Gómez Hoyos, V. (2025). *Evaluación de las buenas prácticas de manufactura (BPM) en un establecimiento de la industria d derivados cárnicos,* [Informe de práctica, Ingeniería Bioquímica, Universidad de Antioquia El Carmen de Viboral] Antioquia, Colombia. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/cf82851b-fe8b-4190-bc48-14027fbd8094

Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2013). Control estadístico de la calidad y seis sigma. https://www.academia.edu/18582072/Control_Estad%C3%ADstico_de_Calidad_y_Seis_Sigma

Hernández, E. (2022). *Buenas prácticas de manufactura en la elaboración de alimentos: desarrollo e implementación de una capacitación de modalidad virtual en contexto de pandemia* [Tesis de posgrado, Universidad Nacional de La Plata]. La Plata, Buenos Aires, Argentina. https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/147546

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización [Conceptualization]	Rosa María Morales Flores .
2	Curación de datos [Data curation]	Mayela Fong Alvarado
3	Análisis formal [Formal analysis]	Alejandra Gaucin Delgado
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	NA .
5	Investigación [Investigation]	Mayela Fong Alvarado.
6	Methodología [Methodology]	Alejandra Gaucin Delgado
7	Administración del proyecto [Project administration]	[Alejandra Gaucin Delgado .
8	Recursos [Resources]	NA
9	Software [Software]	NA .
10	Supervision [Supervision]	Alejandra Gaucin Delgado
11	Validación [Validation]	Sulma Mónica Flores Rivas
12	Visualización [Visualization]	Rosa María Morales Flores
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Alejandra Gaucin Delgado
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Sulma Mónica Flores Rivas.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID059

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Diseño e implementación de máquina semiautomática para optimizar el proceso de soldadura mediante Lean Manufacturing

Design and Implementation of a Semi-Automated Machine to Optimize the Welding Process Using Lean Manufacturing

Jurado-Zamarripa, L.I.[1]; Valdez-Díaz, J.M.[2] ✉; Martínez-Rodríguez, O.L.[3]; Adame-Delgado, R.[4]; Carrera-Barraza, B.[5]

Datos de Adscripción:

[1] Jurado Zamarripa, Laura Isela
Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
laura.jz@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3302-4802

[2] ✉ Valdez Díaz, José Manuel
Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
jose.vd@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1461-1783

[3] Martínez Rodríguez, Olga Lidia
Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
olga.mr@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5857-7857

[4] Adame Delgado, Raymundo
Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
raymundo.ad@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9248-6376

[5] Carrera Barraza, Brenda
Instituto Tecnológico de Torreón. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
brenda.cb@torreon.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5533-9687

Resumen **- El presente estudio tuvo como objetivo diseñar y fabricar una máquina de punteo semiautomatizada para optimizar el proceso de soldadura por puntos en el área de producción de una empresa de manufactura de estantería, con la finalidad de reducir el tiempo de ciclo por pieza, mejorar la productividad del proceso y disminuir riesgos ergonómicos en los operadores. Para el desarrollo del proyecto se realizó un análisis del proceso actual, identificando un tiempo de ciclo elevado, posturas inadecuadas y movimientos innecesarios debido a la operación manual, lo cual impactaba en la eficiencia operativa del proceso. La metodología se basó en los principios de Lean Manufacturing mediante la aplicación de un estudio de tiempos, análisis de movimientos, reutilización de materiales y redistribución de componentes, así como la evaluación de las condiciones ergonómicas, permitiendo comparar el desempeño del proceso antes y después de la implementación de la nueva máquina de punteo. Los resultados mostraron una reducción del tiempo de ciclo de 73 a 57 segundos, equivalente a una mejora del 21.9%, lo que permitió incrementar la producción a 63 piezas por hora, además de una mejora en las condiciones ergonómicas de los operadores, evidenciada en la disminución de posturas forzadas y movimientos innecesarios. Se concluye que el diseño e implementación de la máquina punteadora mejora la eficiencia del proceso productivo y demuestra que el rediseño de procesos y la aplicación de metodologías ergonómicas contribuyen al incremento de la productividad y a mejores condiciones de trabajo.**

Palabras Clave: Ergonomía, Lean Manufacturing, Productividad, Soldadura por puntos, Tiempo de ciclo

Abstract **- The objective of this study was to design and manufacture a semi-automated spot-welding machine to optimize the spot-welding process in the production area of a shelving manufacturing company, with the aim of reducing cycle time per part, improving process productivity, and reducing ergonomic risks for operators. To develop the project, an analysis of the existing process was conducted, identifying a high cycle time, awkward working postures, and unnecessary movements associated with manual operation, which negatively affected the operational efficiency of the process. The methodology was based on Lean Manufacturing principles through the application of time studies, motion analysis, material reuse, and component redistribution, together with an assessment of ergonomic working conditions. This approach enabled a comparison of process performance before and after the implementation of the new spot-welding machine. The results showed a reduction in cycle time from 73 to 57 seconds, representing a 21.9% improvement, which increased production output to 63 parts per hour. In addition, operators' ergonomic conditions improved, as evidenced by a reduction in awkward postures and unnecessary movements. It is concluded that the design and implementation of the semi-automated spot-welding machine improved the efficiency of the production process and demonstrated that process redesign and the application of ergonomic methodologies contribute to increased productivity and improved working conditions.**

Keywords: Cycle time, Ergonomics, Lean Manufacturing, Productivity, Spot Welding

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID063

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, toda industria de manufactura se rige por una elevada competitividad y por conservar estándares altos de calidad; la optimización de los procesos productivos se ha convertido en una parte fundamental para mejorar la eficiencia operativa y fortalecer el desempeño de las organizaciones. La manufactura esbelta, también conocida como Lean Manufacturing, es un enfoque de gestión centrado en las mejoras incrementales en las operaciones. (Flores & Núñez, 2022).

Las empresas del sector metalmecánico, en particular, enfrentan el reto de mejorar su desempeño operativo a partir del uso eficiente de sus recursos, la reducción de tiempos improductivos y la mejora continua de sus métodos de trabajo. De acuerdo con Torres Unapanta, M. D. C. (2025). La aplicación de estas herramientas de Lean Manufacturing no solo impacta de forma positiva en la eficiencia operativa, sino que también fortalece el compromiso dentro de la organización con los procesos de mejora continua.

En este contexto, la incorporación de soluciones semiautomatizadas accesibles, combinadas con enfoques de mejora como Lean Manufacturing, representa una alternativa favorable para incrementar la productividad sin requerir inversiones excesivas, ya que la integración entre principios Lean, criterios ergonómicos y automatización parcial favorece simultáneamente la eficiencia operativa y las condiciones de trabajo del personal (Colim et al., 2021).

Uno de los procesos que suele presentar oportunidades de mejora en este tipo de industria es la soldadura por puntos, especialmente cuando se realiza de manera manual o con equipos que no han sido diseñados considerando criterios ergonómicos y de eficiencia operativa. En muchas ocasiones, estas operaciones dependen en gran medida de la habilidad del operador, lo que introduce variabilidad en los tiempos de ciclo, incrementa el esfuerzo físico y limita la capacidad de producción. Además, la repetitividad de los movimientos y las posturas adoptadas durante la ejecución del trabajo pueden generar fatiga, lo que no solo afecta el desempeño, sino también la seguridad y salud del trabajador. El método de evaluación ergonómica RULA se enfoca en identificar la exposición de los trabajadores a los factores de riesgo que pueden ocasionar trastornos en las extremidades superiores relacionados con las operaciones que realizan (Guzmán, 2023).

A pesar de que existen soluciones automatizadas en el mercado, no siempre son accesibles para empresas pequeñas o medianas, ya sea por su costo o por la complejidad de su implementación. Esto ha llevado a que muchas organizaciones opten por adaptar o rediseñar sus equipos existentes; el rediseño puede incluir la optimización de los procesos de fabricación, la modernización de la maquinaria y la implementación de nuevas tecnologías, entre otras medidas (Célleri, 2023).

En palabras de Socconini (2019), el Lean Manufacturing, o producción esbelta, se define como el conjunto de procesos continuos y sistemáticos de identificación y eliminación de desperdicios que no agregan valor al sistema productivo.

De acuerdo con Aneloa Curay, E.P. (2025), las herramientas Lean Manufacturing representan una alternativa viable para mejorar la productividad de una empresa, ya que facilitan la eliminación de actividades que no generan valor, promueven la eficiencia operativa y fomentan una cultura de mejora continua, contribuyendo así a la sostenibilidad y competitividad en el mercado. En este sentido, la aplicación de estos principios permite identificar aquellas actividades tales como movimientos innecesarios, tiempos de espera o esfuerzos redundantes.

En este sentido, una revisión sistemática de 63 investigaciones desarrolladas en sectores manufactureros de países desarrollados y en desarrollo confirmó que la implementación de Lean Manufacturing contribuye favorablemente al desempeño operativo, particularmente mediante la reducción de desperdicios, la mejora de los procesos y el aprovechamiento más eficiente de los recursos (Maware et al., 2022)

Sin embargo, es importante reconocer que la mejora del proceso no depende únicamente de eliminar desperdicios, sino también de considerarlos ante esta situación. Se planteó como objetivo el diseño e implementación de una máquina de punteo semiautomatizada que permitiera optimizar el proceso, reducir el tiempo de ciclo y mejorar las condiciones ergonómicas del operador. La propuesta se fundamenta en la integración de un sistema mecánico de desplazamiento controlado, que sustituye parte de la manipulación de las condiciones en las que el operador realiza su trabajo.

La ergonomía, en este punto, juega un papel fundamental. Un diseño de estación de trabajo adecuado puede reducir significativamente la carga física, mejorar la postura y facilitar la ejecución de las tareas. De acuerdo con Mejía Gracia et al. (2025), la ergonomía ha transitado de ser un concepto vinculado inicialmente a la administración de empresas a consolidarse como una disciplina científica estrechamente relacionada con la gestión del capital humano en las organizaciones. Su integración en los entornos laborales plantea cuestionamientos respecto a los efectos que puede generar en el desempeño del personal y en la productividad institucional.

El método RULA fue desarrollado en 1993 por McAtamney y Corlett, de la Universidad de Nottingham (Institute for Occupational Ergonomics), con el objetivo de evaluar la exposición de los trabajadores a factores de riesgo que originan una elevada carga postural y que pueden ocasionar trastornos en los miembros superiores del cuerpo; para la evaluación del riesgo se consideran en el método la postura adoptada, la duración y frecuencia de ésta y las fuerzas ejercidas cuando se mantiene. (Diego-Mas, 2015).

Cuando se integran criterios ergonómicos en el diseño de maquinaria o herramientas, se logra no solo un beneficio para el

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID063

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

trabajador, sino también una mejora en la eficiencia del sistema. Esto se debe a que un operador en mejores condiciones puede mantener un ritmo de trabajo más constante y con menor probabilidad de error.

Valenciana et al. (2024) afirman que, desde esta perspectiva, la ergonomía deja de considerarse únicamente una medida preventiva y se convierte en un elemento estratégico para la mejora de los procesos productivos, debido a que la disminución de esfuerzos innecesarios y movimientos repetitivos repercute directamente en la productividad, la calidad y la estabilidad del proceso.

El presente estudio se desarrolla en una empresa dedicada a la fabricación de estantería metálica, donde el proceso de punteo representaba un área crítica debido a sus tiempos elevados y a las condiciones de operación del personal.

Para Lean Manufacturing, de acuerdo con Heuristic Solutions (2025), un estudio de movimientos exitoso va más allá del simple análisis de cómo se realizan las tareas: también aplica un conjunto de directrices comprobadas, conocidas como los principios de economía de movimientos. Estos principios constituyen la base del estudio de movimientos y garantizan que cada movimiento, la colocación de herramientas y la disposición del puesto de trabajo contribuyan a la máxima eficiencia con el mínimo esfuerzo.

A partir de un diagnóstico inicial, se identificaron diversas oportunidades de mejora relacionadas con la manipulación manual de las piezas, la repetitividad de los movimientos y la falta de un sistema que permitiera estandarizar la operación. Diversos estudios recientes señalan que las posturas forzadas, la repetitividad y la manipulación manual generan riesgos ergonómicos que impactan directamente en la productividad y en la generación de desperdicios operativos dentro de los sistemas Lean Manufacturing (Monarrez-Orona et al.,2025). Estas condiciones no solo afectan la productividad, sino que también generan un desgaste físico considerable en los operadores.

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo considerando tanto el análisis técnico del proceso como la evaluación de las condiciones de trabajo, lo que permitió generar una solución alineada con las necesidades reales del entorno productivo. A diferencia de otras propuestas más complejas, el enfoque adoptado busca ser funcional y adaptable, priorizando la mejora del desempeño sin comprometer la viabilidad de implementación.

Finalmente, este trabajo no solo pretende mostrar los resultados obtenidos en términos de reducción de tiempos y aumento de la productividad, sino también evidenciar la importancia de integrar diferentes enfoques en la solución de problemas industriales. La combinación de principios de manufactura esbelta, análisis ergonómico y rediseño mecánico demuestra que es posible generar mejoras significativas a partir de intervenciones bien orientadas, incluso en contextos donde los recursos son limitados.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Dentro de este apartado se describe el desarrollo e implementación de una propuesta de mejora en el proceso de punteo de fabricación de estanterías, en una empresa del ramo metalmecánico, mediante el rediseño de una máquina orientada a reducir tiempos de operación, mejorar la ergonomía y optimizar la productividad, considerando análisis de tiempos, diseño de estación de trabajo y aprovechamiento de materiales reutilizados.

Se llevaron a cabo 30 mediciones considerando este tamaño de muestra representativo del tiempo de ciclo de la operación en condiciones normales, correspondiente a la fabricación de la pieza (lámina), con operadores de eficiencia promedio. Registrando el periodo total requerido desde que inicia la operación hasta que finaliza la operación del punteo. Derivado de estas mediciones, se determinó que el llenado de la plantilla, la cual corresponde a la colocación manual de las varillas en su posición antes del punteo, requería un tiempo promedio de 15 segundos.

En cuanto al tiempo del proceso de punteo y extracción de la pieza terminada, requería 58 segundos, obteniendo un tiempo total de ciclo de 73 segundos por unidad producida, generando retrasos en las entregas al cliente, presentando bajo rendimiento por fatiga laboral, derivado de actividades prolongadas y repetitivas. Aspectos que son significativos para la satisfacción del cliente y disminuyen la competitividad de la empresa, lo que sugiere la existencia de actividades que no agregan valor al proceso.

Se realizó un análisis ergonómico mediante el método RULA (Rapid Upper Limb Assessment), el cual permite evaluar el riesgo postural en extremidades superiores, considerando factores como postura, fuerza, repetitividad y carga estática, generando una puntuación que indica el nivel de intervención requerido. Enfocado en las posturas y movimientos repetitivos y prolongados adoptados por el operador durante la realización de las tareas.

En este método se observan los ciclos de trabajo, se seleccionan las posturas más forzadas o frecuentes, se asignan puntuaciones numéricas a los ángulos de cada parte del cuerpo y se calculan puntuaciones finales que indican el nivel de riesgo.

Como referencia para realizar la evaluación, podemos observar la Figura 1; esta representa las posturas que el operador debe adoptar para poder realizar el proceso actual de punteo que es con la máquina antigua.

Las posturas forzadas y movimientos repetitivos afectan la eficiencia del proceso. En la Tabla 1 se observan los elementos considerados en el análisis, la identificación de riesgos y la propuesta de mejora para la nueva máquina, la cual describe la evaluación RULA en cuanto a riesgos en cuello, tronco, brazos, muñecas, piernas y manipulación de carga, asociados a fatiga y sobreesfuerzo. Las mejoras propuestas reducen posturas forzadas y movimientos innecesarios, lo que incrementa la productividad al disminuir desperdicios de tiempo y movimientos.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID063

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 1
Método RULA hoja de campo.

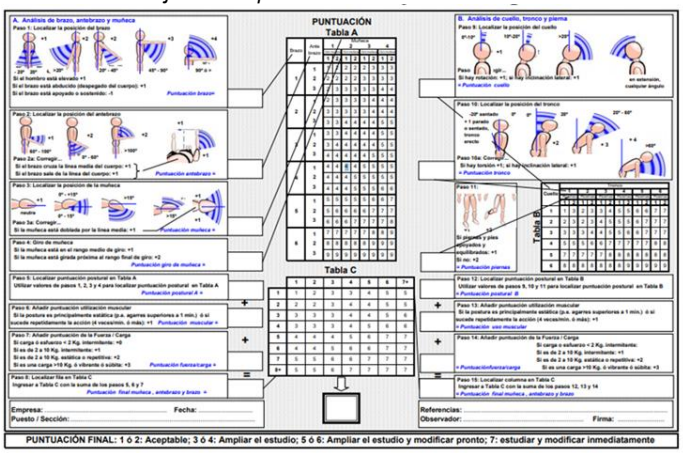


Tabla 1
Elementos de Análisis postural mediante el Método RULA

Segmento Corporal Evaluado	*Postura Observada en el Proceso Original (Antes)*	*Riesgo Identificado*	*Mejora observada con la nueva máquina (Después)*
Cuello	Inclinación frecuente hacia adelante durante el punteo	Fatiga muscular y tensión cervical	Menor inclinación debido a mejor posicionamiento
Tronco	Flexión constante para manipular plantilla y piezas	Sobrecarga lumbar y postura forzada	Postura más recta y estable
Brazos	Elevación y movimientos repetitivos durante manipulación	Fatiga muscular y desgaste articular	Reducción del esfuerzo repetitivo
Muñecas	Giro y desviaciones al sujetar piezas	Riesgo de tensión y Lesiones repetitivas	Posición más natural de trabajo
Piernas	Permanencia prolongada de pie y desplazamientos	Cansancio físico y fatiga	Menor necesidad de desplazamiento
Manipulación de carga	Carga manual de plantillas	Sobrecarga física	Eliminación parcial de manipulación manual
Movimiento general	Repetitivo y con esfuerzo constante	Riesgo ergonómico elevado	Movimiento más controlado y fluido

Para el nuevo diseño de la máquina de punteo, se consideraron las alternativas de mejora para extremidades superiores e inferiores que se podrían implementar en el proceso. Mediante diferentes propuestas se consideró factible un nuevo equipo de soldadura que permitiera optimizar este proceso, reducir los tiempos de operación y disminuir el esfuerzo físico del operador.

Se procedió a realizar un diseño conceptual de una nueva máquina de punteo, con el propósito de optimizar la operación mediante la disminución del tiempo y la mejora de la postura ergonómica para reducir la carga física que los operadores tienen que realizar durante dicho proceso. En la Figura 2 se muestra el diseño, el cual consiste en una mesa de trabajo acompañada de un bastidor que se coloca dentro de la mesa, esta misma pieza de trabajo está equipada con un sistema de correderas realizadas con soleras de metal el cual permite el desplazamiento controlado del bastidor en el eje “Y”, mientras que en el mismo bastidor se integró una segunda corredera con movimiento en el eje “X”, para que en el corran los pistones y electrodos que son controlados por medio de un transformador y una válvula solenoide. Conservando la manipulación manual del bastidor.

En el rediseño propuesto se continúa con la manipulación manual y se contribuye a la eliminación de desperdicios asociados al movimiento, mejorando la continuidad del flujo de trabajo. Asimismo, la incorporación del sistema de desplazamiento mecánico favorece la estandarización de la operación, reduciendo la variabilidad del proceso y aumentando la eficiencia productiva, lo que coincide con investigaciones recientes que señalan que el rediseño de tareas y estaciones de manufactura basado en principios ergonómicos permite mejorar simultáneamente el desempeño operativo y las condiciones de trabajo del operador (Arkouli et al., 2024).

Figura 2
Rediseño Máquina punteadora.



Después de que se aprobó el diseño conceptual, se dio a la tarea de buscar y seleccionar el material y los componentes necesarios para la elaboración de la mesa de punteo, dando como resultado la siguiente lista de materiales. Ver Tabla 2.

Cabe mencionar que los elementos de la construcción de la mesa corresponden a materiales y componentes de reúso.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID063

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Tabla 2
Materiales y componentes requeridos

Componente	*Material*	*Cantidad*	*Dimensiones*
PTR 2 pulgadas	Acero al carbono	10	2x2 pulg, 3 mm espesor, long variable
PTR 1.5 pulgadas	Acero al carbono	8	1.5x1.5 pulg, 3 mm espesor
Solera acero	Acero	6	1.5-2 pulg ancho
Ángulo metálico	Acero	6	2x2 pulg
Baleros	Acero	12	-
Tornillos niveladores	Acero galvanizado	4	5-10 cm
Transformador	Eléctrico	1	-
Láminas de cobre	Cobre	30	25 cm largo
Electrodos	Cobre	2	3 cm grosor
Pistones neumáticos	Acero/Aluminio	2	-

En la etapa correspondiente al proceso de fabricación se incluyen el corte, maquinado, ensamble de las piezas estructurales, así como la instalación de las guías lineales y correderas, pistones, electrodos, mangueras, válvulas, conexión del transformador y la instalación de un sistema de enfriamiento. Se cuidaron aspectos críticos y esenciales como la alineación, nivelación y precisión de movimiento, con el propósito de garantizar un funcionamiento óptimo y seguro durante la operación.

Se llevó a cabo la evaluación de distintos tipos de perfiles metálicos disponibles en los racks, considerando los criterios de la resistencia mecánica, facilidad de corte y soldadura. La elección del perfil correcto resultó fundamental para garantizar la rigidez y estabilidad de la estructura principal del nuevo sistema. Se utilizaron perfiles PTR de 2 pulgadas para armar tanto el bastidor como las patas de la mesa y perfiles PTR de 1 ½ pulgadas para fabricar los brazos de la mesa.

El proceso de soldadura de la mesa fue una de las etapas más críticas del proyecto; esto se debió a que la precisión en las uniones y la calidad de las soldaduras determinan directamente la resistencia mecánica, estabilidad y durabilidad del equipo. Una vez confirmadas las posiciones, se procedió a realizar puntos de soldadura temporales con el fin de mantener las piezas en su lugar y evitar desplazamientos durante el proceso. Manteniendo una inspección constante de los cordones, asegurando una fusión adecuada entre los metales base y evitando defectos como porosidades o inclusiones. Una vez finalizado el armado estructural, se procedió a la etapa de nivelación de la mesa. Esta se realizó mediante la instalación de tapones metálicos en la base de las patas de la mesa, cada uno con un orificio central mecanizado que permitió el montaje de tornillos niveladores de 5/16” de diámetro.

La fabricación del bastidor tiene la finalidad de sostener el transformador, pistones y electrodos, permitiendo su desplazamiento controlado sobre los ejes “X” y “Y”. Iniciando con el corte y preparación de los perfiles, cuidando las medidas y tolerancias indicadas en los planos de diseño. Posteriormente, las piezas fueron alineadas mediante escuadras metálicas para garantizar las uniones a 90° antes del proceso de soldadura. Una vez verificada la correcta alineación, se procedió a soldar los elementos, logrando cordones uniformes y resistentes.

Una vez terminado el bastidor y verificado con las dimensiones especificadas, se adecúa a la mesa de trabajo de manera funcional y segura.

Los componentes de los carritos deslizantes fueron seleccionados para soportar el peso del bastidor para un movimiento controlado a lo largo de la mesa, garantizando un traslado suave, estable y preciso en el eje “Y” y el eje “X”. Colocando topes de seguridad, que actúan como protección mecánica, evitando posibles daños sobre el desplazamiento y garantizando la integridad estructural del conjunto de la máquina.

Para la instalación del transformador dentro del sistema de punteo, se realizó un análisis técnico y estratégico con la finalidad de determinar la posición más adecuada; esto garantiza la eficiencia operativa en el desplazamiento y la seguridad de los componentes eléctricos.

Una vez instalado el transformador para el sistema de accionamiento, se implementó el uso de pistones neumáticos, los cuales operan bajo el principio de presión de aire comprimido. La elección de un sistema neumático para la fabricación de una nueva máquina de punteo se basó en su fiabilidad, la rapidez de respuesta y su facilidad de mantenimiento, además de su clara capacidad para regular la fuerza de aplicación según el tipo de material a puntear.

Para la realización de esta fase del proyecto, se utilizaron barras de cobre; estas barras cumplen con la función fundamental dentro del sistema de punteo al actuar como conductores principales de la corriente eléctrica encargada de efectuar la soldadura por puntos.

Para el ensamblaje de los electrodos se tomaron como referencia las medidas, el espacio y el recorrido operativo de los pistones, asegurando que estos pudieran ejecutar su movimiento completo sin interferir con la plantilla fija en la mesa, permitiendo que los electrodos hicieran contacto efectivo con las piezas a soldar.

Para realizar la fusión del material durante el proceso de soldadura se realizó por medio de energización del sistema de punteo empleando láminas de cobre de alta conductividad, que actúan como conductores de energía eléctrica desde el transformador hacia los electrodos asegurando la corriente suministrada por el transformador.
Se adaptó la unión estructural de los perfiles de aluminio en los carritos, asegurando su movimiento coordinado sin generar resistencia adicional ni pérdida de fluidez. Estos perfiles fueron seleccionados por su bajo peso, alta resistencia a la deformación y su facilidad de maquinado.

Para la integración del sistema se ensambló la base del arco directamente sobre el transformador que se encuentra en el carrito inferior del bastidor, facilitando el desplazamiento del transformador de forma conjunta con el sistema de punteo,

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID063

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

reduciendo notablemente el movimiento irregular y las vibraciones.

Este diseño no solo mejoró la sincronización mecánica del conjunto, sino que también aportó mayor estabilidad en la estructura y seguridad operativa.

Una vez concluido el proceso de sincronización y alineación de los carritos deslizantes del bastidor, se optó por la instalación de un sistema de enfriamiento, el cual tiene la finalidad de mantener la temperatura operativa dentro de los límites seguros y evitar el sobrecalentamiento de los componentes eléctricos y mecánicos del sistema de punteo.

El sistema neumático es el encargado de accionar los pistones durante el proceso de punteo y fue diseñado para garantizar un movimiento preciso, rápido y sincronizado de los electrodos, permitiendo así la correcta ejecución del proceso de soldadura. El funcionamiento de esta válvula depende de un circuito electromecánico de control, compuesto por un relé electromagnético y una bobina de activación. Cuando la bobina recibe corriente eléctrica, el relé se activa, permitiendo la apertura de la válvula del paso de aire comprimido hacia los pistones, dándoles movimiento al mecanismo lineal del mismo.

Se realizaron pruebas de operación para verificar el desempeño del sistema, evaluando la estabilidad del movimiento, la precisión del punteo y la repetibilidad del proceso. Los resultados confirmaron una operación más fluida, controlada y eficiente en comparación con el sistema original.

Desde el enfoque Lean, la nueva máquina elimina desperdicios asociados al movimiento y mejora la continuidad del flujo de trabajo. Asimismo, la reducción de la manipulación manual disminuye la variabilidad del proceso, favoreciendo la estandarización de la operación y estableciendo una relación directa entre la disminución de movimientos, la reducción del tiempo de ciclo y el incremento de la productividad. Resultados similares han sido documentados en procesos de manufactura donde la integración de herramientas Lean con criterios ergonómicos permitió optimizar el desempeño operativo y mejorar la eficiencia del sistema (Suranuntchai & Chutima, 2023).

La implementación del sistema permitió reducir el tiempo de ciclo de 73 a 57 segundos, lo que representa una mejora del 21.9%, incrementando la capacidad de producción y optimizando el uso del tiempo efectivo de trabajo. Ver la Tabla 3.

Estos resultados validan la reducción de movimientos innecesarios e impactan directamente en la productividad del proceso.

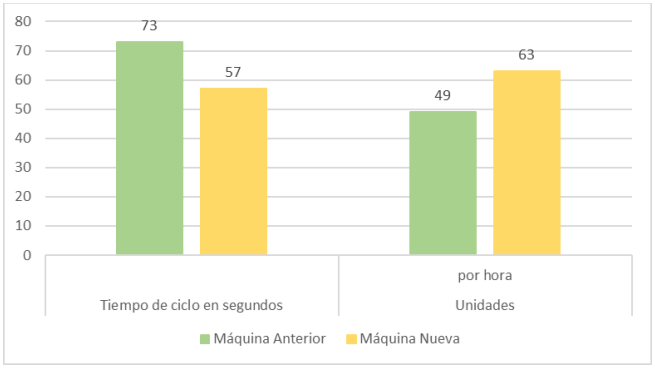
Tabla 3
Análisis comparativo del tiempo de ciclo y la producción por hora

Máquinas	*Tiempo de ciclo en segundos*	*Unidades por hora*
Máquina Anterior	73	49
Máquina Nueva	57	63
Mejoras absolutas y relativas	Disminución de 16 segundos por unidad	Se obtuvo un incremento de 13 unidades
Porcentaje de mejora	21.9%	28.17%

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

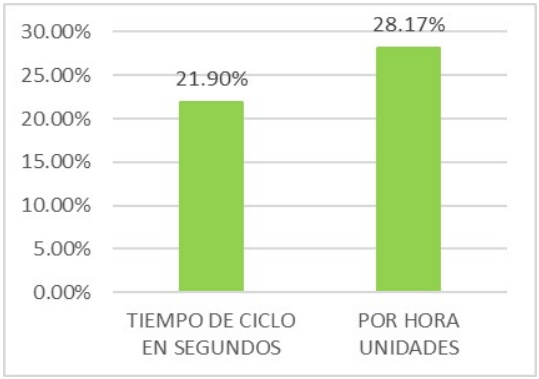
Los resultados obtenidos permiten observar claramente cómo impacta la propuesta sobre el desempeño del proceso de punteo. La disminución del tiempo de ciclo de 73 a 57 segundos se refleja directamente en la capacidad de producción, que pasa de 49 a 63 piezas por hora, como se observa en la Figura 3.

Figura 3
Representación de los resultados



Antes de la implementación, la ejecución del proceso con manipulación manual, generaba variabilidad, pausas innecesarias y un desgaste constante en el operador. Al incorporar el sistema semiautomatizado, gran parte de estos movimientos se vuelven más controlados, en una operación más fluida y continua. Este cambio se produjo, registrando un incremento del 28%. Como se aprecia en la Figura 4, se manifiesta un cambio en la forma en la que se realiza la operación de manera significativa.

Figura 4
Porcentaje de Mejora.



IV. CONCLUSIONES

Más allá del valor numérico, este resultado se torna importante debido a que a lo largo de un turno completo el acumulado supera las cien piezas adicionales, lo cual puede representar una ventaja competitiva importante para la empresa en términos de cumplimiento de pedidos y tiempos de entrega.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID063

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Los resultados obtenidos permiten concluir que el diseño e implementación de la máquina de punteo semiautomatizada permitieron optimizar el proceso de soldadura por puntos analizado. La reducción del tiempo de ciclo de 73 a 57 segundos representó una mejora del 21.9 %, mientras que la capacidad de producción aumentó de 49 a 63 piezas por hora, equivalente a un incremento del 28.17 %. A lo largo de un turno de trabajo, este incremento representa una mejora relevante en la capacidad productiva de la empresa y puede contribuir al cumplimiento de los requerimientos de producción y tiempos de entrega.

La implementación de la nueva máquina de punteo refleja principios fundamentales de Lean Manufacturing, al enfocarse en la reducción de desperdicios asociados a tiempos improductivos, movimientos innecesarios y baja eficiencia operativa. A través de la mejora del proceso se logró disminuir el tiempo de ciclo, incrementando la producción por turno y optimizando el aprovechamiento del tiempo efectivo de trabajo. Asimismo, la eliminación de actividades que no agregan valor permitió mejorar la productividad y reducir esfuerzos operativos, aspectos que forman parte de la filosofía de mejora continua promovida por Lean Manufacturing. Estos resultados son consistentes con investigaciones recientes que destacan que la integración de principios ergonómicos y de mejora continua en el diseño de sistemas de manufactura genera beneficios simultáneos en productividad, eficiencia operativa y bienestar del trabajador (Hasanain, 2024).

En consecuencia, los resultados obtenidos permiten establecer que se cumplió el objetivo planteado de diseñar e implementar una máquina de punteo semiautomatizada orientada a optimizar el proceso de soldadura por puntos, al reducir el tiempo de ciclo, incrementar la productividad y mejorar las condiciones ergonómicas de la operación mediante la aplicación de principios de Lean Manufacturing.

En conclusión, el éxito de la implementación de la máquina de punteo semiautomatizada reafirma que la eficiencia operativa y la salud ocupacional son mutuamente dependientes. Tal como concluyen Trebuňa et al. (2025), las iniciativas Lean que omiten los requerimientos ergonómicos fracasan en sostener sus incrementos de productividad; por el contrario, su integración armónica garantiza un entorno laboral seguro y operativamente superior.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, TecNM: Instituto Tecnológico de Torreón por el apoyo brindado a este proyecto.

Extendemos también nuestro agradecimiento al Ing. Jesús Rubén Sandoval Cortez y a la empresa por su disposición y por facilitar la información. Su colaboración hizo posible este estudio.

VI. REFERENCIAS

Aneloa Curay, E. P. (2025). Propuesta de mejora de los procesos productivos para aumentar la productividad de la empresa MUNDODECOR S.A. a través de herramientas Lean Manufacturing: Propuesta de mejora de los procesos productivos de la empresa MUNDODECOR S.A. a través del uso de herramientas Lean Manufacturing [Trabajo de integración curricular, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital de la Escuela Politécnica Nacional. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/26414

Arkouli, Z., Michalos, G., Kokotinis, G., & Makris, S. (2024). Worker-centered evaluation and redesign of manufacturing tasks for ergonomics improvement using axiomatic design principles. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 55, 188-209. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.10.001

Célleri Cabrera, A. E. (2023). Propuesta de rediseño para mejorar la competitividad en una empresa metalmecánica de Guayaquil (Master's thesis). https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26363

Colim, A., Morgado, R., Carneiro, P., Costa, N., Faria, C., Sousa, N., & Arezes, P. (2021). Lean Manufacturing and Ergonomics Integration: Defining Productivity and Wellbeing Indicators in a Human–Robot Workstation. Sustainability, 13(4), 1931. https://doi.org/10.3390/su13041931

Diego-Mas, José Antonio. Evaluación postural mediante el método RULA. Ergonautas, Universidad Politécnica de Valencia, 2015. [consulta16-05-2026]. Disponible online: https://www.ergonautas.upv.es/metodos/rula/rula-ayuda.php

Flores Benítez, F. R., & Núñez Silva, G. B. (2022). Aplicación del Lean Manufacturing a una pequeña empresa de fundición metálica. E-IDEA 4.0 Revista Multidisciplinar, 4(11), 18–30. https://doi.org/10.53734/mj.vol4.id216

Guzmán Medina, M. K. (2023). Evaluación de riesgos ergonómicos en la empresa Cerrajería Artística Vera, aplicando el método RULA para el área de producción y el método ROSA para el área administrativa [Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. https://dspace.espoch.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/7c9db0b9-3d32-4932-9b28-928fa8c51519/content

Hasanain, B. (2024). The Role of Ergonomic and Human Factors in Sustainable Manufacturing: A Review. Machines, 12(3), 159. https://doi.org/10.3390/machines12030159

Heuristic Solutions. (2024). Motion study: Boost efficiency and reduce waste. Sugoya India. https://www.sugoyaindia.com/motion-study/

Maware, C., Okwu, M. O., & Adetunji, O. (2022). A systematic literature review of lean manufacturing implementation in manufacturing-based sectors of the developing and developed countries. International Journal of Lean Six Sigma, 13(3), 521–556. https://doi.org/10.1108/IJLSS-12-2020-0223

Mejía Gracia, C. A., Domínguez Domínguez, C. F., Díaz Martínez, J. V., Hernández García, R. A., & Galván Sarabia, A. (2026). Análisis Sistemático del Impacto de la Ergonomía en la Productividad Laboral. Estudios Y Perspectivas Revista

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Científica Y Académica , 5(4), 6390–6417. https://doi.org/10.61384/r.c.a..v5i4.1641

Monárrez Orona, G. A., Flores Sánchez, A., Gómez Zepeda, P. I., & Portillo Reyes, M. (2023). Análisis ergonómico mediante la aplicación del método RULA en proceso de industria manufacturera. IPSUMTEC, 6(3), enero–junio. https://www.researchgate.net/publication/385756394_Analisis_ergonomico_mediante_la_aplicacion_del_metodo_rula_en_proceso_de_industria_manufacturera#fullTextFileContent

Socconini, L. (2019). Lean Manufacturing. Paso a paso. Barcelona, España: Marge Books.

Suranuntchai, N., & Chutima, P. (2023). Practical Implementation of Lean Management Techniques and Ergonomic Consideration to Improve Manual Assembly Process During the COVID-19 Crisis. Engineering Journal, 27(2). https://doi.org/10.4186/ej.2023.27.2.29

Torres Unapanta, M. D. C. (2025). Propuesta de mejora de los procesos productivos en la empresa metalmecánica Metalinox aplicando herramientas de manufactura esbelta http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/30154

Valencia Jarama, J. L., Gutiérrez Canchasto, G. A.& Flores Marchán, V. M. (2024). Lean Manufacturing en el mejoramiento continuo de la productividad. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.14002915

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización [Conceptualization]	Laura Isela Jurado Zamarripa, Jose Manuel Valdez Diaz, Olga Lidia Martínez Rodríguez
2	Curación de datos [Data curation]	Laura Isela Jurado Zamarripa, Olga Lidia Martínez Rodríguez, Raymundo Adame Delgado
3	Análisis formal [Formal analysis]	Jose Manuel Valdez Diaz, Olga Lidia Martínez Rodríguez, Brenda Carrera Barraza
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Olga Lidia Martínez Rodríguez, Brenda Carrera Barraza
5	Investigación [Investigation]	Laura Isela Jurado Zamarripa, Raymundo Adame Delgado, Brenda Carrera Barraza
6	Methodología [Methodology]	Jose Manuel Valdez Diaz, Olga Lidia Martínez Rodríguez, Laura Isela Jurado Zamarripa,
7	Administración del proyecto [Project administration]	Jose Manuel Valdez Diaz, Laura Isela Jurado Zamarripa,
8	Recursos [Resources]	Raymundo Adame Delgado, Brenda Carrera Barraza, Olga Lidia Martínez Rodríguez
9	Software [Software]	Olga Lidia Martínez Rodríguez
10	Supervision [Supervision]	Jose Manuel Valdez Diaz, Raymundo Adame Delgado
11	Validación [Validation]	Jose Manuel Valdez Diaz, Olga Lidia Martínez Rodríguez, Raymundo Adame Delgado
12	Visualización [Visualization]	Brenda Carrera Barraza, Olga Lidia Martínez Rodríguez, Laura Isela Jurado Zamarripa,
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Laura Isela Jurado Zamarripa, Olga Lidia Martínez Rodríguez
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Jose Manuel Valdez Diaz, Brenda Carrera Barraza, Raymundo Adame Delgado

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID063

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Aplicación de PEPS para Reducir la Merma en un Almacén de Alimentos del Sector Cinematográfico

Application of FIFO to Reduce Inventory Losses in a Food Warehouse in the Cinema Industry

Gasca-Ortega, L.Y.[1]; Huizar-Vargas, O[2]; García-Hernández, V.C.[3]; Salas-Rodríguez, D.R. [4]

Datos de Adscripción:

[1] Gasca Ortega, Lizzy Yaretzi
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
212310158@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0699-0945

[2] ✉ Huizar Vargas, Oscar
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
oscar.hv@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3708-9315

[3] García Hernández, Violeta del Carmen
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
violeta.gh@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7852-5030

[4] Salas Rodríguez, Diana Rosa
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
diana.sr@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5381-0877

Resumen **- La implementación de la técnica PEPS (Primeras Entradas, Primeras Salidas) en el almacén de alimentos de una empresa dedicada al entretenimiento cinematográfico en la región Lagunera. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, aplicado y de alcance comparativo mediante un diseño preexperimental con mediciones de la merma antes y después de la aplicación de PEPS. Esta implementación reorganiza el almacén conforme al orden de ingreso y la caducidad de los productos, generando un sistema de entradas y salidas, el conteo diario de los inventarios, el uso de las etiquetas de vida útil de cada producto, ayudas visuales y capacitación. Para la evaluación del efecto de la implementación de PEPS, se compararon 30 días de registros de la merma previos y 30 días posteriores a la aplicación, se analizó con estadística descriptiva y una prueba t para muestras relacionadas. La investigación muestra una reducción de la merma en resultados económicos de $113,742.04 en agosto a $12,541.56 en septiembre; esto equivale a una reducción del 88.97%. Asimismo, el promedio de la merma se reduce de 13.23% a 6.89%, con una diferencia estadística significativa (*p* < .003). En conclusión, la implementación de PEPS fue una estrategia efectiva para reducir y fortalecer la eficiencia de la gestión de almacenes; también mejoró la rotación de productos, el control de caducidades, la disciplina operativa y la trazabilidad del inventario.**

Palabras Clave **- Área de almacén, Gestión, Merma, PEPS, Per cápita.**

Abstract **- The implementation of the FIFO (First In, First Out) technique in the food warehouse of a film entertainment company in the Laguna region. The research employed a quantitative, applied, and comparative approach using a pre-experimental design with measurements of shrinkage before and after FIFO implementation. This implementation reorganized the warehouse according to the order of receipt and expiration of products, creating an entry and exit system, daily inventory counts, the use of shelf-life labels for each product, visual aids, and training. To evaluate the effect of FIFO implementation, 30 days of shrinkage records before and 30 days after implementation were compared using descriptive statistics and a paired-samples t-test. The research shows a reduction in shrinkage as a result of economic impacts, from $113,742.04 in August to $12,541.56 in September, equivalent to an 88.97% reduction. Similarly, the average shrinkage decreased from 13.23% to 6.89%, with a statistically significant difference (p < .003). In conclusion, the implementation of FIFO (First-In, First-Out) was an effective strategy for reducing shrinkage and strengthening the efficiency of warehouse management. It also improved product turnover, expiration date control, operational discipline, and inventory traceability.**

Keywords: FIFO, Management, Per capita, Shrinkage, Waterhouse área.

I. INTRODUCCIÓN

La importancia de la mejora continua lleva a la implementación de la técnica PEPS en una empresa de entretenimiento cinematográfico en la Comarca Lagunera, presentando un panorama amplio de los antecedentes y la relevancia del tema. Entre las primeras acciones están la identificación de un sistema de inventario poco eficiente y un manejo inadecuado del almacenamiento de productos, lo que genera altos niveles de merma y pérdidas económicas.

Ante este tipo de problemáticas, han sido implementadas

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

diversas técnicas de mejora continua, como el uso del diagrama de Pareto 80/20, el diagrama de Ishikawa, el método PEPS.

El diagrama de Pareto es una herramienta de calidad y análisis estadístico que ayuda a identificar cuáles son las causas más relevantes del problema. Se basa en el principio 80/20 de Vilfredo Pareto, el cual plantea que cerca del 80% de los efectos provienen de solo el 20% de las causas. Esta técnica organiza la información en gráficas de barras ordenadas de mayor a menor frecuencia, lo que facilita reconocer los problemas prioritarios dentro de un proceso y enfocar los esfuerzos en las áreas que generan mayor impacto (Chávez et al., 2024).

El diagrama de Ishikawa, diagrama de causa-efecto o también llamado diagrama de espina de pescado, es una herramienta de calidad que sirve para identificar, organizar y analizar las posibles razones detrás de un problema dentro de una organización. Los diversos artículos científicos señalan que este recurso facilita la comprensión de cómo se relacionan las causas con un problema específico, lo que apoya la toma de decisiones y fomenta la mejora continua de los procesos (Rodgers & Oppenheim, 2019).

El ciclo de implementación, evaluación y ajuste operativo es un proceso que ayuda a la mejora, ayuda a medir los resultados y a corregir lo que no funciona. Este procedimiento ayuda a dar seguimiento a las intervenciones de las PEPS. Primeramente, se identifican el problema, las causas y las acciones necesarias en cuestión:

Diagnóstico y Planificación. En la investigación se realizó un registro de la merma, diagramas de Ishikawa y análisis de Pareto. Se ajustó y estandarizó; se identificó el producto estancado, dañado o próximo a caducar; se estableció la meta menor al 10 %.

Implementación. Se ponen en práctica las acciones planeadas como organizar el almacén mediante PEPS, acomodar productos por fecha de entrada y salida, estandarizar conteos cíclicos.

Evaluación. Se revisan datos para determinar si las acciones produjeron mejoras; se comparan con datos de treinta días antes y treinta días después; se revisa el porcentaje de la merma, porcentajes antes y después de la implementación; se revisan resultados estadísticos.

Ajuste y estandarización. Se corrigieron las desviaciones encontradas y se conservaron las prácticas que dieron buenos resultados, como la corrección de productos colocados fuera del orden PEPS y la actualización de registros incompletos; se reforzó la capacitación (Naúpas et al., 2014).

Estas fases se repiten en un ciclo continuo que permite avanzar hacia transformaciones reales y sostenibles. Además, la técnica mencionada fomenta el diálogo, la colaboración y la construcción de conocimiento a partir de la experiencia compartida. La mejora continua no es algo aislado, sino el resultado de una reflexión constante sobre la realidad, con el objetivo de lograr cambios significativos.

El método PEPS, basado en el sistema de costeo, establece que los artículos más antiguos en el inventario deben ser los primeros en salir, garantizando una rotación adecuada y un control más preciso de los costos asociados (Rodríguez, 2022). Diversas fuentes académicas señalan que el almacén representa un área crítica dentro de las operaciones de una empresa, debido a que, influye directamente en el control de los inventarios, el abastecimiento y la continuidad de las actividades de la empresa, esto es especialmente en aquellas que dependen de insumos perecederos, como es el caso de la dulcería en los complejos cinematográficos; ya que, una mala administración puede generar pérdidas económicas, desabasto o incluso desperdicio de producto (Escobar, Linfanti & Adame, 2017).

La investigación se respalda en estudios que muestran que disponer de una infraestructura adecuada, implementar controles operativos eficientes y mantener la capacitación continua del personal, son aspectos fundamentales para mejorar la calidad del servicio, además de disminuir pérdidas. Asimismo, se reconoce que la implementación de ayudas visuales y controles estrictos permite reducir la merma, mejorar la calidad del producto entregado y optimizar la experiencia del cliente (Rodríguez & Adell, 2013). Aunque existen estudios sobre el manejo de inventarios y manejo de materiales perecederos , es de suma importancia generar evidencia aplicada en industrias del sector cinematográfico, donde la venta de los alimentos se tiene condicionada con la asistencia a las salas de cines y por la necesidad de disponibilidad inmediata en los mismos, el análisis de este contexto permitió evaluar la utilidad de PEPS, no como un sistema de rotación de entradas y salidas de mercancías , sino como una parte de una estrategia para mejorar la trazabilidad, perdidas y la disciplina operativa. En el almacén analizado de la empresa cinematográfica de la Comarca Lagunera se identificaron deficiencias en la recepción, organización y salida de las mercancías; tales productos, en mayor medida, no se acomodaban en orden de primeras entradas y primeras salidas, los registros presentaban inconsistencias y no se realizaba un seguimiento sistemático de los faltantes, sobrantes y productos deteriorados. Como resultado de la implementación de PEPS, la merma alcanzo inicialmente $113,742.04 en agosto, y una reducción después de la aplicación de PEPS para septiembre de $12,541.56, esto equivale al 88.97% de reducción equivalente a 13.23% a 6.89% respectivamente con una diferencia significativa de ($p < .003$).

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Dentro de la solución del problema se plantean varias técnicas de análisis, que en conjunto ofrecen hallazgos que se convierten en acciones para eliminar las principales causas que generan la merma en el área de almacén de la empresa dedicada al entretenimiento cinematográfico en la región Lagunera. Dentro de la investigación se plantea la hipótesis: ¿Si se aplica PEPS al sistema de inventarios de la empresa dedicada al entretenimiento cinematográfico en la región Lagunera, la merma se reducirá? Partiendo con esta interrogante se desarrollan la siguiente implementación.

2.1 PEPS.

De acuerdo con Rodríguez (2022), en este contexto, la metodología PEPS (Primeras Entradas, Primeras Salidas), se presenta como una herramienta eficaz para el control y la

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID065

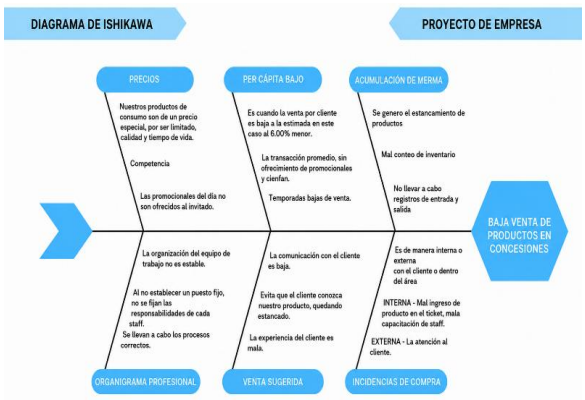
This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

rotación adecuada de los productos, garantizando que aquellos que ingresan primero al almacén sean los primeros en salir, evitando con ello pérdidas por caducidad, estancamiento o merma, pasando por las etapas de recepción, que es el registro de las entradas de cada producto ante el proveedor, almacenamiento que es el orden de las bodegas por fechas de caducidad y familias, control, registro y monitoreo de cada uno de los productos con él conteo de cierre, salida de producto que manejan diariamente con la predicción de visitas de invitados y finalmente la evaluación, con él historial de inventario mensual junto con PER CAPITA (promedio de venta o consumo generado por cada cliente que asiste al cine).

2.2 Estudio y evaluación inicial

En esta primera etapa se elaboró un análisis de las ventas en la empresa dedicada al entretenimiento cinematográfico en la región Lagunera, en las áreas de dulcería, taquilla y almacén, encontrando los posibles detractores que impiden la venta de productos en concesiones (incidencia de compra, transacción promedio, venta sugerida, retroalimentación del invitado). En la Figura 1, muestra diversas causas por la baja de ventas en el área de concesiones, al aplicar la técnica del diagrama de pescado, se encuentran causas principales apuntando contundentemente a dos de las causas principales de la reducción de las ventas y la generación de faltante, estas apuntaban a la "acumulación de merma"; ya que la pérdida de un producto o el estancamiento del mismo, impactan demasiado a este tipo de giro, por lo que al no estar en movimiento las mercancías cada día que pasa afecta en las caducidades de los productos , generando un descontrol de las entradas y salidas del almacén. Dentro de los objetivos de la empresa, la merma debe ser menor al 10%. Después del análisis y/o aplicación de la técnica causa-efecto o diagrama de espina de pescado, arrojó como principal causa la "acumulación de merma", ya que abarca todos los demás factores (mal conteo de inventario, estancamiento de producto, no llevar a cabo el registro de entradas y salidas).

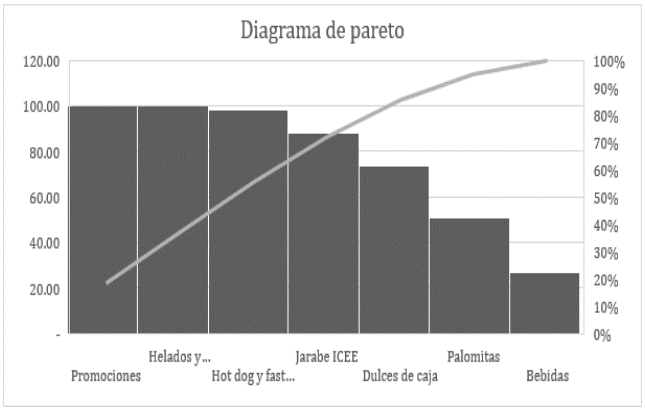
Figura 1
Diagrama de Ishikawa. Causas de ventas bajas



El diagrama de ISHIKAWA mostrado en la figura 1 indica los motivos por los que ocurre la baja venta de producto en el área de concesiones, para saber cómo ir enfrentando el problema y encontrar el problema principal.

Diagrama de Ishikawa (Causa-Efecto): se utilizó para identificar las causas raíz que impedían la rotación eficiente de los productos, clasificando los factores de venta en categorías como personal, métodos de trabajo y almacenamiento.
El diagrama de Pareto se aplicó para identificar que el 80% de la merma era generada por el 20% de las familias de productos. En la figura 2 se muestra el análisis de las principales causas de la merma de producto dentro de la empresa: promociones, helados, hot-dogs y jarabe ice atienden al 80% acumulado principal de la merma. A su vez, dentro del análisis se determinó que estas causas se concentraban en tres familias específicas: bebidas, palomitas y dulces en la caja.

Figura 2
Diagrama de Pareto de la Merma del producto.



La figura 2 muestra el diagrama que aplica el principio de 80/20 y sirve para identificar las principales causas de pérdidas o merma de producto dentro de la empresa. Promociones, helados y hot dogs atienden al 80% acumulado principal de la merma.

2.3 El ciclo de Implementación, evaluación y ajuste operativo

Es un proceso que ayuda a la mejora, ayuda a medir los resultados, a corregir lo que no funciona; este procedimiento ayuda a dar seguimiento a las intervenciones de las PEPS. Primeramente, se identifican el problema, las causas y las acciones necesarias en cuestión. Se trata de un enfoque en el cual cada acción aplicada dentro de un sistema u organización provoca una respuesta observable que ayuda a mejorar lo planeado. Esa reacción es posteriormente examinada con el propósito de identificar sus efectos, valorar los resultados obtenidos y, en función de ello, introducir ajustes o mejoras obtenidos, para ajustar los procesos operativos.

2.4 Algoritmos, Fórmulas y Herramientas Analíticas

Sistema COGS (Contabilidad de Costos de Bienes Vendidos).

Cuando se fabrica un producto, lo más importante es darle un valor porque eso mueve la economía y, al final, cumple con lo que el cliente necesita. Este sistema es un motor que impulsa la economía al calcular el gasto necesario para producir y

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID065

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

almacenar bienes (Cabrera, 2020). Se utilizó para interpretar las salidas y el valor del producto en relación con su precio de venta, alineando los registros contables con la realidad operativa. La fórmula base empleada es:
COGS = Inventario Inicial + Compras – Inventario Final. Este cálculo permite reflejar de manera precisa el costo de lo vendido y el impacto financiero de la merma.

2.5 Conteo diario.

Dentro de las acciones y para dar respuesta a la merma, se implementa un conteo diario de inventario en el turno de cierre, en el área de dulcería, para identificar: merma, faltantes y sobrantes, ya que estos también los consideran merma o faltante. La implementación consistió en registros escritos para el conteo de inventario en la hora de cierre (de 10:00 p.m. a 12:30 a.m.), para registrar el conteo diario de producto que queda después del horario laboral y registrar los faltantes, ya sea por venta o por faltante de diversos productos. En la tabla 1, se menciona el primer conteo que dio inicio el día 1 de septiembre de 2025, conteo diario de cada grupo de familia en ventas.

Tabla 1
Conteo al cierre (sobrantes de artículos, agrupados en familias).

Producto/ familia	Unidad	Total	Cálculo
Bebidas			
Jarabe de Coca-Cola.	Litro	7.93	24.64
Jarabe de Coca-Cola Light.	Litro	2.52	2.30
Jarabe Coca-Cola sin azúcar	Litro	4.15	3.90
Jarabe Sprite	Litro	5.57	14.01
Jarabe Fanta	Litro	5.60	13.48
Jarabe Sidral	Litro	8.04	6.27
Jarabe fuze tea	Litro	8.15	6.77
Vaso 22 OZ Coca	PZA	24	
Vaso 32 OZ Coca	PZA	135	
Vaso 42 OZ Coca	PZA	17	
Agua Ciel 1 LT	PZA	36	
Valle fruit naranja	PZA	6	
Fizz limón	PZA	9	
Fizz naranja	PZA	2	
Fuzetea 600 ML	PZA	3	

Nota. La tabla demuestra el tipo de conteo que se manejó diariamente para el registro de inventario de los productos de concesiones manejados en Pieza, Litros, kg, clasificados en familias.

La tabla 1 es una muestra representativa del corte de turno, donde se agrupan por familias los artículos sobrantes (bebidas, dulces en caja, promociones, helados y paletas, hot dog y fast food, palomitas, jarabes icee).

2.6 Elaboración del instrumento de medición en Excel para la gestión de la bodega e implementación de registros.

Se elabora un documento en Excel de los pedidos por mes basándose en los meses de agosto y septiembre de 2025, con la finalidad de no afectar el costo con sobrante ni faltante, contemplando el HSV (Historical Stock Variance) de dulcería y bodega de meses anteriores. Dentro de las instalaciones se actualizaron los registros del producto, tomando en cuenta la caducidad, fechas de venta, volumen, entre otros factores. En la figura 3, se muestra el ejemplo del llenado de HSV del registro de inventario, donde se asignan los registros de refresco o jarabes de Coca-Cola, indicando cada sección de uso, como entrada, salida, pérdida, entre otros factores:
Control y Monitoreo Diario: se estableció un monitoreo constante mediante el conteo de cierre diario y el uso del Historical Stock Variance Report (HSV).
Registro de variaciones: el HSV permite comparar el inventario físico contra el teórico, identificando diariamente el producto dañado, faltante o estancado.
Tablas de porcentaje de merma: se diseñaron tablas estructuradas por fecha, cantidad de salida y cálculo de merma diaria para identificar los días de mayor desperdicio y facilitar la toma de decisiones operativas.

El historial de bodega general (figura 3) indica el producto, fecha de conteo, hora de registro, código, incluyendo el relleno de cantidades de entrada, salida, sobrante y merma o faltante, el cual se registra de manera diaria en los cierres de la empresa.

Figura 3
Informe de Variaciones Históricas (HSV) de dulcería y bodega..


Historical - Stock Variance

Bodega General

From: 01/08/2025 21:51 - Conteo Largo To: 30/08/2025 18:22 - Conteo Largo

Stock Item	Code	Opening	Net Sales	Deliveries	Transfer Loe In	Trans. Bl In	Disposal Name	Wastage Products	Returns Loe out	Transfer out	Trans. Bl out	Manual Adjust Movements	Total Expected	Counted	Adjust.	Stocking Unit
FUZE TEA 600 ML	1070123	12	0	54	0	0	0	0	0	-60	0	0	-6	6	6	0 Each
JARABE DEL DRRFM LIMON PET	1070163	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 L

En el proceso de control del flujo de materiales, para la entrada y salida del almacén se estructuraron etapas operativas que permitieron la transición de un estado de desorden y pérdidas a un sistema de control eficiente. Se implementó un protocolo que incluye el uso de un formato de registro de entrada de producto, donde se detalla la familia del producto, cantidad, código, fecha de ingreso y el personal responsable de la autorización, como se muestra en la figura 4.
Asimismo, la figura 4 indica el producto que entrará, el tipo de familia al que pertenece, cantidad, código, fecha de entrada y la persona que la recibió y autorizó dentro de la empresa.

Se implementó un protocolo de llenado de datos de los productos que llegan al almacén, implementando el llenado del formato como una función obligatoria para los trabajadores/almacenistas encargados, como se muestra en la figura 4, que les facilitará el trabajo al momento del acomodo de los productos en el almacén.

Al realizar el pedido, se hace un análisis de ventas del producto para realizar un pronóstico; así se tiene la cantidad que se recibirá. Por eso se aplican los nombres del gerente y del bodeguero, confirmando la cantidad de producto que entró.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID065

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 4
Control de entrada de producto.

SEMANA	3					
PRODUCTO	CANTIDAD	FAMILIA	NOMBRE Y FIRMA			
			USUARIO	FECHA	BODEGERO	GERENTE
Canastilla mediana	500	Palomitas	10100001	20/10/25	Javier	Adriel
Canastilla chica	1703	Palomitas	10100001	20/10/25	Javier	Adriel
Canastilla grande	5900	Palomitas	10100003	20/10/25	Javier	Adriel
Vaso 22 oz	975	Bebidas	10300003	20/10/25	Javier	Adriel
Vaso 33 oz	11700	Bebidas	10300004	20/10/25	Javier	Adriel
Vaso 42 oz	10600005	Bebidas	10600005	20/10/25	Javier	Adriel
Tapa 32 oz	8850	Bebidas	10400005	20/10/25	Javier	Adriel
Tapa 42 oz	9100	Bebidas	10600006	20/10/25	Javier	Adriel
Jumbo ICEE	790	ICEE	60500001	20/10/25	Javier	Adriel
Vaso ICEE 32 oz	1840	ICEE	60500004	20/10/25	Javier	Adriel
Tapa ICEE 32 oz	1000	ICEE	60501005	20/10/25	Javier	Adriel
Totopo preparado	2575	Hot dog Fast	40700001	20/10/25	Javier	Adriel
Charola para nachos	1950	Hot dog Fast	40500010	20/10/25	Javier	Adriel
Pan congelado	777	Hot dog Fast	40500013	20/10/25	Javier	Adriel
Papel termico	1950	Hot dog Fast	40600016	20/10/25	Javier	Adriel

2.7 Almacenamiento y clasificación

En esta etapa se organizaron las tres bodegas principales de la empresa (dulcería, secos y congelados). Se introdujo una estrategia de clasificación por colores para mejorar la eficiencia y seguridad del almacén, además de tomar en cuenta la técnica PEPS (Primeras Entradas, Primeras Salidas), para así evitar que los productos perecederos se echaran a perder y se convirtieran en merma:

Uso de simbología: se asignaron colores específicos a todas y cada una de las cajas de productos, esto para identificar rápidamente la categoría en la que debe de acomodarse, como se muestra en la Figura 5

Control de caducidad: se implementaron etiquetas de "tiempo de vida" a todos los productos perecederos, para así asegurar que el acomodo respete las fechas críticas, garantizando que lo primero que entró sea lo primero en estar disponible para la venta, tomando en cuenta la técnica implementada PEPS (Primeras Entradas, Primeras Salidas), como se presenta en la figura 5.

Figura 5
Simbología de colores de clasificación de caja de producto
.

COLOR	TIPO DE PRODUCTO
	Vasos de Icee – Coca-Cola 22 – 42 Canastilla grande – Maíz mushroom
	Tapa de Icee – Coca-Cola 22 – 42 Canastilla mediana
	Vasos de Icee – Coca-Cola 22 – 42 Canastilla mega – Maíz mariposa
	Tapa Icee – Coca Cola 22 – 42 Jarabes de bebidas
	Promocionales Canastilla jumbo
	Dulcería – Totopo en porciones Queso granel

Nota. Clasificar productos por color no es solo una cuestión estética, sino una estrategia funcional que mejora la organización, seguridad y eficiencia del almacén. En un cine, esta práctica ayuda a controlar insumos perecederos, evitar desperdicios y mantener una operación más ágil y ordenada.

En la figura 6, se muestra el antes y después del acomodo y/o clasificación de las bodegas con las nuevas condiciones y limitaciones en los estantes, la nueva imagen de la empresa, con nuevas ayudas visuales y su respectivo acomodo mediante la metodología PEPS.

Figura 6
Antes y después de los tiempos de vida de las mercancías



Nota. El acomodo de las bodegas se muestra en el área de secos y caja de dulces, donde no se respetan las alineaciones y el acomodo. Se muestra que no había un lugar establecido según lo que establece el manual de operaciones.

2.8 Elaboración de ayudas visuales

Se elaboraron tablas de registro de productos que entran y salen, instrucciones visuales del proceso y del cuidado del producto, incluyendo su uso, para guiar al staff o personal calificado en realizar el control del inventario. Se elaboró un cuadro de caducidades con un lapso de tiempo no mayor a 6 meses, incorporado para establecer el tiempo de vida de cada producto.

En la figura 7, se muestra la creación de las nuevas etiquetas de tiempo de vida estimado para las diferentes ayudas visuales que operan en la empresa dedicada al entretenimiento cinematográfico en la región Lagunera. En cada una de las etiquetas de caducidad, los datos que se requieren son el nombre del producto, la fecha de caducidad (el tiempo final de vida), la hora en que se registró, junto con el nombre del personal autorizado.

Este tipo de etiquetas se implementó para tener un mejor control de inventario de productos y que cumpla con la salida correcta de los productos en el manejo diario; los productos que se clasificaron por medio de tiempos de vida fueron los productos abiertos del almacén y los congelados como salchicha, helados, pan congelado y jarabes, los cuales son los principales elementos que crean la mayor problemática por su mal manejo de salida y control de inventario.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID065

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 7
Nuevos formatos del antes y después de etiquetar productos .



2.8 Capacitación

Se implementa una junta mensualmente sobre los resultados de ventas y motivación, dentro de la empresa dedicada al entretenimiento cinematográfico en la región Lagunera. Los temas principales de las reuniones consisten en: actualización de datos de operación para capacitar al staff, almacenistas, bodegueros, coordinadores. Esta capacitación ayudó al nuevo sistema que se implementó dentro de la empresa, especialmente en el área de almacén. En las reuniones se ven capacitación de personal, presentación de nuevos integrantes, motivación por logro de objetivos y retroalimentación de ventas, también se realizaron evaluaciones de cada uno de los procesos de entrada y salida de producto, para poder medir que se están aplicando los conocimientos de cada uno de los protocolos de procesos e higiene, en este caso la elaboración de palomitas, alimento y sobre todo bebidas (esto incluye el área de posición de insertos de jarabes que son uno de los factores principales de la merma).

2.9 Seguimiento estadístico

Para evaluar el efecto de la implementación de PEPS, se compararon 30 días de registros de la merma previos y 30 días posteriores a la implementación de PEPS; se utilizó estadística descriptiva y una prueba t para muestras relacionadas; el análisis se realizó en el software IBM SPSS Statistics 23.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La implementación de PEPS en la empresa dedicada al entretenimiento cinematográfico en la región Lagunera dio resultados significativos tanto económicos como operativos y estadísticos.

3.1 Evaluación Estadística

Finalmente, se realiza un análisis comparativo utilizando el historial de inventario mensual y el indicador per cápita (promedio de consumo por cliente) para validar el impacto de la técnica PEPS y su rentabilidad.

3.2 Recepción

Se registró la entrada de cada uno de los productos al momento de ser recibidos por los proveedores. Se mantuvo un control de entradas siguiendo el protocolo de inspección de cada producto. Esto obligó a la implementación de un manual de procesos de operación de entrega-recepción.

3.3 Almacenamientos

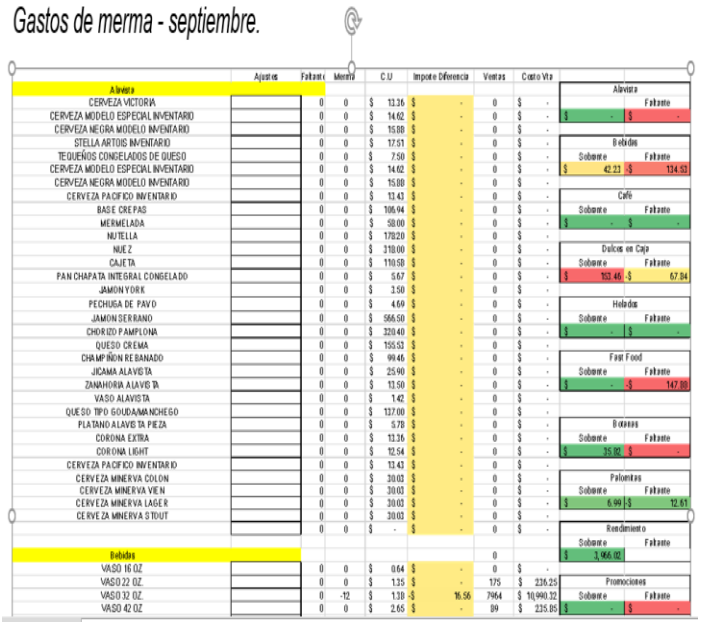
Los productos dentro de las bodegas y su fecha de caducidad se volvieron de prioridad urgente y se implementa en orden de importancia el acomodo dentro de la bodega, junto con su área establecida, respetando las limitaciones. Gracias a la implementación de etiquetas de tiempo de vida, se muestran el acomodo y el límite de cada producto.

3.4 Control

Con ayuda del Historical (software interno de la empresa), se interpretó el valor de la merma, ya que gracias al registro de cada entrada y/o salida del producto, también hubo registro de conteo diario de cada día de operación dentro de la empresa, logrando identificar la cantidad de producto dañado o faltante. Una vez implementada PEPS, en el área establecida, fue necesario realizar el cálculo de la merma, incluyendo económicamente el reflejo que equivale la misma con su cambio constante del mes de agosto y septiembre 2025.

La figura 8 muestra el sistema y el análisis de los cálculos correspondientes a los meses de agosto y septiembre y cómo se calcula el costo de la merma: $113,742.04 en agosto, que se reduce considerablemente en septiembre a $12,541.56. Se determinan también los gastos de la merma que se dieron en el periodo del mes de septiembre.

Figura 8
Imagen del registro y/o control de la merma en agosto-septiembre del sistema Histórica.



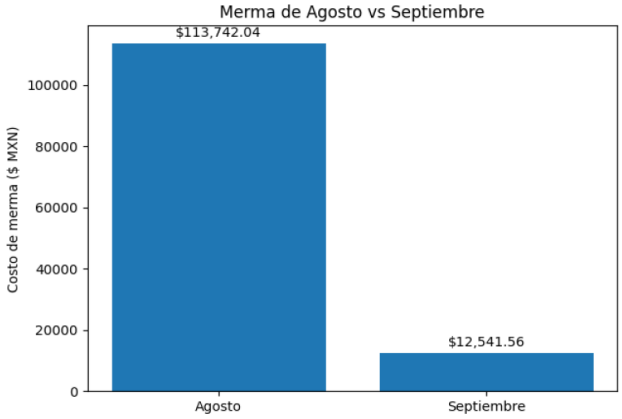
.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID065

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Dentro de la figura 9 se muestran el sistema y el análisis de los cálculos correspondientes al mes de agosto/septiembre. Se puede observar cómo el costo de merma equivale a $113,742.04, reduciéndose de manera considerable en el mes de septiembre

Figura 9
Merma en agosto vs. septiembre del sistema Histórica.



3.5 Salida

Con la implementación de PEPS, fue necesario considerar los productos almacenados con fechas más antiguas registradas. Al considerar este procedimiento implementado, se obtiene un sistema de primeras entradas y primeras salidas por rotación de ventas/registro. En la tabla 2 se representa una muestra del mes de septiembre para el análisis realizado del control del porcentaje de la merma por fecha, de manera semanal. La tabla de porcentaje de merma está estructurada por la fecha, la salida del producto, la cantidad de merma diaria y finalmente el cálculo de porcentaje que equivale esa cantidad de merma

Tabla 2
Porcentaje de merma por fecha (cada semana).

Fecha de conteo	Cantidad de salida de producto	Cantidad de merma de producto	Porcentaje de merma total por día
01-sep-25	1365	143.57	9.52
07-sep-25	762	200.22	20.81
14-sep-25	2847	309.19	9.80
21-sep-25	888.86	296.74	25.03
28-sep-25	2748	218.48	7.36
05-oct-25	1848	131.929	6.66
12-oct-25	1947	165	7.81
19-oct-25	1965	129	6.16
26-oct-25	1985	125	5.92
30-oct-25	1456	78	5.08

3.6 Evaluación

En la en la tabla 3 se hace un análisis estadístico de muestras emparejadas donde se visualiza los meses, la media de ambos meses, la N, la desviación estándar y la media de error estándar, se analizó en el Software SPSS. Se presentan los datos de la media para los meses de agosto y septiembre, meses que se compararon para analizar en dicha corrida.

Tabla 3
Estadística de muestras emparejadas.

Estadísticas de muestras relacionadas

		Media	N	Desviación estándar	Media de error estándar
Par 1	antes	13.23	30	6.17104	1.12667
	después	6.886	30	1.26174	.23036

En la figura 10 se muestran los resultados de la prueba de muestras relacionadas, correspondiente a los meses de agosto-septiembre de 2025, con 60 datos, que arrojaron la media, la desviación estándar, el error estándar, el intervalo de confianza del 95% de la diferencia, el valor t y los grados de libertad.

Figura 10
Datos registrados de la merma en SPSS



Nota. El antes y después son los datos registrados del porcentaje de la merma de cada día del mes, de agosto y de septiembre, con el software SPSS, para así obtener la prueba T, media y desviación estándar.

Tras concluir las actividades realizadas en la empresa, se efectuó un análisis de cada etapa y de los resultados generales de la merma; se utilizó IBM SPSS Statistics 23 para la estadística descriptiva, herramienta que permitió evaluar muestras, correlaciones y significancia estadística. Con ello se verificó la hipótesis inicial del proyecto, la cual era: si se aplicaba PEPS, habría una reducción significativa de la merma, determinando si era válida o debía rechazarse. Los hallazgos se organizaron conforme a las fases de PEPS.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID065

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. Recepción: se implementó un control de entrada de productos mediante inspección y registro, lo que derivó en la elaboración de un manual de procesos operativos.
2. Almacenamiento: inicialmente, la fecha de caducidad no se consideraba en el acomodo de productos en bodega. Con la introducción de etiquetas de tiempo de vida, se logró un orden más eficiente y delimitado por áreas.
3. Control: el sistema Historical permitió registrar entradas, salidas y conteos diarios, identificando productos dañados o faltantes. Además, se calculó la merma tanto en cantidad como en impacto económico, con variaciones observadas en agosto y septiembre

En la tabla 4 se muestran el antes y el después al aplicar la técnica de PEPS, mostrando una significancia de la mejora de 0.003 y concluyendo que la mejora continua fue significativa en la aplicación de la técnica de PEPS y dando respuesta favorable a la hipótesis. Se observa que la merma de alimentos antes para el mes de agosto (M=13.2320, una DS=6.17104), comparado con el mes de septiembre (M= 6.8863, una DS= 1.26174), t (24) = -4.807 y p= 0.003.

Tabla 4

Prueba de muestra del antes y el después de la merma del almacén de congelados.

Prueba de muestras relacionadas

		Diferencias relacionadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	después - antes	-6.27080	6.53091	1.30618	-8.97463	-3.56297	-4.807	24	.003

La metodología PEPS aseguró que los productos más antiguos fueran los primeros en salir, siguiendo la rotación de ventas. En la evaluación se aplicaron pruebas estadísticas de muestras relacionadas (agosto-septiembre con 60 datos, treinta antes y treinta después de aplicar PEPS). Los resultados incluyeron medias, desviación estándar, errores estándar, intervalos de confianza al 95%, valores t y grados de libertad, lo que permitió cuantificar y comparar la merma entre ambos meses. En resumen, la aplicación de la metodología PEPS junto con el análisis estadístico en SPSS permitió controlar merma, optimizar procesos y validar hipótesis del proyecto.

IV. CONCLUSIONES

La integración de la metodología PEPS permitió reducir de manera significativa la merma en alimentos y, al mismo tiempo, representó una oportunidad para actualizar y fortalecer los procesos de operación. El enfoque de mejora en la implementación de PEPS aseguró que cada etapa del proceso se relacionara con la siguiente, generando estabilidad en la estructura organizacional y reforzando aspectos de seguridad, higiene y mantenimiento.

La aplicación de la metodología PEPS, en el área del almacén de la empresa, generó un impacto directo en la reducción de la merma de productos alimenticios. Antes de la intervención, en agosto, las pérdidas ascendían a $113,742.04 mensuales, cifra que representaba un riesgo crítico para la rentabilidad de la empresa. Tras los primeros ajustes, en septiembre, la merma se redujo a $12,541.56, lo que significó una disminución de 9 veces.

Este resultado confirma la efectividad en la revisión continua de procesos y el compromiso del personal en la ejecución de las estrategias. Además, se logró superar la meta inicial de reducción, alcanzando un porcentaje de merma mejor al planteado.

Los beneficios derivados de esta implementación no se limitaron a la reducción de costos directos. También se observaron mejoras en:

- Eficiencia operativa, al optimizar el flujo de productos en el almacén.
- Aprovechamiento de la materia prima, reduciendo desperdicios y maximizando el valor de los insumos.
- Disminución de la presión en áreas de almacenamiento y disposición de residuos, contribuyendo a un entorno más ordenado y sustentable.
- Fortalecimiento de la cultura organizacional, al involucrar al personal en prácticas de mejora continua y responsabilidad compartida.

En conjunto, los resultados muestran que la metodología PEPS no solo es una herramienta de control de inventario, sino también un mecanismo para impulsar la eficiencia global de la empresa y garantizar la sostenibilidad de sus procesos

V. AGRADECIMIENTOS

Se da el agradecimiento a la empresa dedicada al entretenimiento cinematográfico en la región Lagunera y al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.

VI. REFERENCIAS

Cabrera de Palacio, M. D. (2020). La contabilidad de costos en la producción de bienes y servicios. En contexto, 203-230. https://doi.org/10.53995/23463279.551

Chávez, L., De-La-Rosa, S., Manjarres, J., Valbuena, S., & Becerra-Torres, M. (2024). Diagrama de Pareto. Perspectiva de la Asignatura de Control de la Calidad. Boletín de Innovación Logística y Operaciones, 6(1), 51-56. https://doi.org/10.17981/bilo.6.1.2024.07

Escobar, W.J., Linfati, R. y Adame J., W. (2017). Gestión de Inventarios para distribuidores de productos perecederos. *Ingeniería y Desarrollo*, *35* (1). https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85248898012

Lewin, K., Tax, S., Stavenhagen, R., Fals, O., Zamosc, L., & Kemmis, S. (1946). La investigación acción participativa. Editorial Popular.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Lucas, J. L. (2023). Afganistán: "acción-reacción" en la lucha contra organizaciones violentas extremistas. *Foro Internacional*, 99-140. https://doi.org/10.24201/fi.v64i1.2980

Naúpas, P, H., Mejía, M, E., Novoa, R, E., & Villagómez, P, A. (2014). *Metodología de la investigación: Cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis* (4.ª ed., pp. 368-369). Ediciones de la U.

Rodgers, M., & Oppenheim, R. (2019). Ishikawa diagrams and Bayesian belief networks for continuous improvement applications. *The TQM Journal*, *31*(3), 294-318. https://doi.org/10.1108/tqm-11-2018-0184

Rodríguez, G. A. (2022). Aproximaciones del método PEPS en beneficio de las pymes para un mejor control de inventario. *Revista De Investigación Académica Sin Frontera: Facultad Interdisciplinaria De Ciencias Económicas Administrativas - Departamento De Ciencias Económico Administrativas-Campus Navojoa*, (37), 11. https://doi.org/10.46589/rdiasf.vi37.447

Rodríguez, M. I. L., & Adell, E. G. (2013). Control cuantitativo de la calidad en una empresa del sector servicios = Quantitative quality control in a company of the service industry. *Pecvnia Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales Universidad de León*, *16/17*, 197. https://doi.org/10.18002/pec.v0i16/17.1341

Sjoerdsma, M., & Van-Weele, A. J. (2015). Managing supplier relationships in a new product development context. *Journal Of Purchasing and Supply Management*, *21*(3), 192-203. https://doi.org/10.1016/j.pursup.2015.05.002

SPSS. (2018). *The SAGE Encyclopedia of Educational Research, Measurement, And Evaluation*. https://doi.org/10.4135/9781506326139.n655

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización [Conceptualization]	Lizzy Yaretzi Gasca Ortega, Oscar Huizar Vargas
2	Curación de datos [Data curation]	Lizzy Yaretzi Gasca Ortega
3	Análisis formal [Formal analysis]	Lizzy Yaretzi Gasca Ortega, Oscar Huizar Vargas Violeta del Carmen García Hernández
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Lizzy Yaretzi Gasca Ortega
5	Investigación [Investigation]	Lizzy Yaretzi Gasca Ortega
6	Methodología [Methodology]	Lizzy Yaretzi Gasca Ortega, Oscar Huizar Vargas
7	Administración del proyecto [Project administration]	Lizzy Yaretzi Gasca Ortega, Oscar Huizar Vargas
8	Recursos [Resources]	Lizzy Yaretzi Gasca Ortega
9	Software [Software]	NA
10	Supervision [Supervision]	Oscar Huizar Vargas, Violeta del Carmen García Hernández
11	Validación [Validation]	Oscar Huizar Vargas, Diana Rosa Salas Rodríguez Violeta del Carmen García Hernández
12	Visualización [Visualization]	Violeta del Carmen García Hernández Oscar Huizar Vargas
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Oscar Huizar Vargas, Diana Rosa Salas Rodríguez Violeta del Carmen García Hernández
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Oscar Huizar Vargas, Diana Rosa Salas Rodríguez Violeta del Carmen García Hernández

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID065

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Minería de Datos y Analítica Visual para la Gestión Integral de Trayectorias Escolares en Ingeniería: Un Enfoque de Design Science Research

Data Mining and Visual Analytics for the Comprehensive Management of Academic Trajectories in Engineering: A Design Science Research Approach

Machado-Díaz, E.[1]; Serrano-Hernández, A.[2] ✉; Román-Landeros, D.A.[3]

Datos de Adscripción:

[1] Machado Díaz, Eduardo
Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. División de Ingeniería en Sistemas Automotrices. Ciudad Lerdo, Durango. México
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
eduardo.md@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2610-7570

[2] ✉ Serrano Hernández, Arturo
Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. División de Ingeniería en Sistemas Automotrices. Ciudad Lerdo, Durango. México
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
arturo.sh@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-1302-5747

[3] Román Landeros, Diego Alberto
Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. División de Ingeniería en Sistemas Automotrices. Ciudad Lerdo, Durango. México
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
diego.rl@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0671-7577

Resumen **- La gestión de trayectorias escolares en los programas de ingeniería enfrenta el reto crítico de procesar volúmenes masivos de datos institucionales para mitigar las altas tasas de deserción temprana. Tradicionalmente, la dependencia de procesos manuales y la fragmentación de los registros en silos administrativos generan un rezago operativo que imposibilita la intervención preventiva. Para resolver esta brecha técnica, el presente artículo expone el diseño y desarrollo de un sistema de minería de datos visual, estructurado bajo la metodología Design Science Research (DSR) y el estándar CRISP-DM. Se construyó una arquitectura computacional en Python mediante un robusto motor de Extracción, Transformación y Carga (ETL) que implementa algoritmos de coincidencia difusa para normalizar catálogos irregulares y unificar la información en un repositorio relacional. La validación técnica comprobó la eficacia del sistema al procesar de manera longitudinal un censo poblacional de 961 expedientes académicos y estructurar 23,722 calificaciones transaccionales. En su aplicación práctica, el tablero interactivo permitió diagnosticar objetivamente una deserción del 72.1% en las cohortes fundadoras, correlacionando visualmente este fenómeno con la severidad en asignaturas filtro y la inestabilidad de la plantilla docente. Durante la evaluación empírica con usuarios expertos, la interfaz obtuvo un puntaje de 87.5 en la Escala de Usabilidad del Sistema (SUS), confirmando una excelente aceptabilidad. Se concluye que el artefacto tecnológico reduce drásticamente la carga cognitiva, transformando historiales estáticos en un triaje operativo que fundamenta la toma de decisiones para impulsar la retención estudiantil.**

Palabras Clave - Analítica visual, Design Science Research, Eficiencia terminal, Minería de datos educativos, Python, Trayectorias escolares.

Abstract **- The management of educational trajectories in engineering programs faces the critical challenge of processing massive volumes of institutional data to mitigate high early dropout rates. Traditionally, the reliance on manual processes and the fragmentation of records in administrative silos generate an operational lag that precludes preventive intervention. To bridge this technical gap, this article presents the design and development of a visual data mining system, structured under the Design Science Research (DSR) methodology and the CRISP-DM standard. A Python-based computational architecture was built through a robust Extract, Transform, and Load (ETL) engine that implements fuzzy matching algorithms to normalize irregular catalogs and unify information in a relational repository. Technical validation proved the system's efficacy by longitudinally processing a population census of 961 academic records and structuring 23,722 transactional grades. In its practical application, the interactive dashboard objectively diagnosed a 72.1% dropout rate in founding cohorts, visually correlating this phenomenon with the severity in gatekeeper subjects and teaching staff instability. During the empirical evaluation with expert users, the interface obtained a score of 87.5 on the System Usability Scale (SUS), confirming excellent acceptability. It is concluded that the technological artifact drastically reduces cognitive load, transforming static academic histories into an operational triage that grounds decision-making to boost student retention.**

Keywords - Design Science Research, Educational data mining, Python, Student retention, Terminal efficiency, Visual analytics.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID071

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto de la gestión de trayectorias en ingeniería

La masificación de la educación superior contemporánea ha transformado a las universidades en entidades generadoras de volúmenes masivos de datos; sin embargo, la retención estudiantil en áreas de Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (STEM) persiste como un desafío analítico central (Chen et al., 2021). Los sistemas de control escolar acumulan registros detallados sobre el desempeño académico, pero la integración y el análisis oportuno de esta información representan una limitante operativa constante para las instituciones.

En el sistema de educación superior tecnológica en México, los programas de ingeniería registran altas tasas de abandono durante los primeros semestres. En esta etapa de transición, la complejidad analítica de las asignaturas de ciencias básicas representa una barrera curricular significativa (García & Ruiz, 2023). Aunque la evidencia de este rezago queda documentada en los historiales académicos, la arquitectura de los datos institucionales frecuentemente opera bajo esquemas fragmentados y en silos tecnológicos aislados.

Esta fragmentación estructural genera deficiencias de procesamiento en la gestión administrativa de las academias y coordinaciones. En la práctica, la extracción de expedientes y el seguimiento de las trayectorias dependen predominantemente de procesos manuales y de la consolidación de hojas de cálculo no estandarizadas. El tiempo que el personal docente y administrativo invierte en la depuración de registros inconsistentes retrasa la capacidad de intervención pedagógica, priorizando la organización mecánica de la información sobre su análisis analítico.

El análisis del desempeño de una cohorte en ingeniería requiere un enfoque longitudinal que trascienda la evaluación transversal al final del ciclo escolar, permitiendo la identificación de patrones de riesgo latentes antes de que se materialice la deserción (López-Zambrano et al., 2021). La carencia de herramientas computacionales que automaticen este seguimiento condena a las instituciones a un modelo de gestión reactivo.

Para anticiparse a estos fenómenos críticos, resulta indispensable implementar arquitecturas tecnológicas eficientes. Reemplazar el procesamiento manual de datos en bruto por una infraestructura analítica permite convertir los repositorios históricos en recursos de información accionables. Esto facilita a las divisiones académicas el diseño de estrategias de acompañamiento precisas y fundamentadas en evidencia para impulsar la retención estudiantil.

1.2 El proceso ETL y el estándar CRISP-DM como fundamento analítico

Para transitar de una administración escolar retrospectiva a un entorno de analítica visual, la infraestructura computacional debe resolver la dispersión estructural de sus repositorios de información. En el ámbito universitario, los registros históricos residen en bases de datos transaccionales con estructuras heterogéneas que reflejan la operación aislada de cada departamento, dificultando su integración directa. La literatura especializada en minería de datos educativos destaca que la consolidación de estos silos administrativos constituye el principal desafío técnico para cualquier despliegue analítico, exigiendo arquitecturas capaces de integrar variables multidimensionales y longitudinales (Sabando & Zambrano, 2024; Wang & He, 2025).

Para dotar de rigor científico a esta consolidación de datos, el modelado informático se fundamenta en las fases de preparación de la metodología CRISP-DM (Cross-Industry Standard Process for Data Mining) (Martinez-Plumed et al., 2021). Bajo este estándar industrial, el proceso de Extracción, Transformación y Carga (ETL) opera como el núcleo arquitectónico. La extracción recopila los expedientes académicos desde los sistemas heredados de control escolar, los cuales frecuentemente generan reportes transaccionales en formatos no estructurados o de texto plano.

La fase de transformación constituye el esfuerzo metodológico central del pipeline computacional. Los historiales estudiantiles de cohortes pasadas presentan varianza operativa, manifestada en inconsistencias tipográficas en los catálogos docentes, claves de asignaturas discontinuadas y registros huérfanos. Mediante rutinas automatizadas programadas en Python, que incluyen algoritmos de coincidencia difusa (Fuzzy Matching) basados en la distancia matemática de Levenshtein, se estandarizan los catálogos y se depuran las anomalías estructurales. Este procesamiento riguroso permite reconstruir el historial del estudiante de manera longitudinal, transformando calificaciones aisladas en una línea de tiempo continua que documenta el avance real de la cohorte (Romero & Ventura, 2020).

La etapa de carga consolida los registros estandarizados en un repositorio relacional normalizado. Automatizar este ciclo elimina la latencia y el error humano inherentes al cruce manual de hojas de cálculo (Cardona et al., 2023). En el contexto operativo de instituciones de alta matrícula como el Tecnológico Nacional de México, esta arquitectura técnica resulta indispensable. Sin un flujo de datos limpio, parametrizado y auditable, los componentes de exploración interactiva y analítica visual carecerían de la validez estructural necesaria para fundamentar el diseño de estrategias institucionales de retención (De Laet et al., 2020).

1.3 Analítica Visual como herramienta cognitiva

El procesamiento masivo de datos mediante arquitecturas ETL resuelve la centralización de la información, pero plantea un desafío secundario: la capacidad de los usuarios para interpretarla sin experimentar fatiga o saturación informativa. En este contexto, la analítica visual se distancia de los reportes estadísticos estáticos al combinar la potencia del cómputo automatizado con el razonamiento humano estructurado. El objetivo radica en implementar Sistemas de Soporte a la Decisión (DSS) mediante tableros interactivos (dashboards), los cuales facilitan el tránsito desde la exploración de datos en bruto hacia la toma de decisiones asertivas en el entorno académico (Haro, 2018).

Los expedientes históricos de los estudiantes de ingeniería son multidimensionales, conteniendo variables temporales y de rendimiento que cambian de manera constante. Desplegar esta información a través de estimaciones de densidad estadística y gráficos jerárquicos aprovecha los atributos preatentivos del

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID071

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

sistema visual humano (Verbert et al., 2013). Esta representación permite a las coordinaciones académicas detectar anomalías, tendencias de reprobación y estructuras de rezago latentes que pasarían desapercibidas en formatos tabulares convencionales. Al mapear visualmente los flujos curriculares, la interfaz gráfica comunica de manera objetiva los puntos exactos donde se fractura el avance de una cohorte.
La simbiosis entre la arquitectura informática subyacente y la visualización interactiva reduce significativamente la carga cognitiva del personal educativo (De Laet et al., 2020). Al delegar la normalización de datos y el cálculo matemático a la infraestructura backend en Python, y la síntesis de resultados a los componentes visuales, la atención del usuario se desplaza desde la manipulación operativa hacia la interpretación estratégica. De este modo, la analítica visual dota a las instituciones de herramientas interactivas que amplifican la capacidad administrativa para diseñar planes de acompañamiento verdaderamente proactivos y fundamentados en evidencia cuantitativa.

1.4 Planteamiento del problema y contribución

En el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo (ITSL), específicamente en la División de Ingeniería en Sistemas Automotrices, los indicadores históricos revelan un desafío crítico en la retención estudiantil. El análisis retrospectivo demuestra que las cohortes fundadoras (ej., generación 2016) registraron tasas de abandono definitivas que alcanzaron hasta el 72.1% de la matrícula inicial. Esta vulnerabilidad estructural exige una evolución inmediata desde un modelo de gestión reactivo hacia un paradigma preventivo fundamentado en evidencia cuantitativa.

La principal barrera tecnológica para consolidar esta transición es la carencia de una infraestructura de datos automatizada. La información académica de las trayectorias reside de manera fragmentada en sistemas legados, almacenada frecuentemente en formatos de texto plano y hojas de cálculo desnormalizadas. La consolidación manual de estos registros genera una latencia operativa severa, impidiendo a las coordinaciones de carrera y academias identificar oportunamente patrones de riesgo temprano, tales como el desgaste acumulativo provocado por la reprobación en asignaturas críticas.

Para resolver esta brecha técnica, la presente investigación expone el diseño y desarrollo de un sistema de minería de datos visual estructurado bajo la metodología Design Science Research (DSR). La contribución central del estudio radica en la construcción de una arquitectura computacional fundamentada en un proceso ETL (Extracción, Transformación y Carga) automatizado en Python, con capacidad comprobada para procesar de manera longitudinal un censo de 961 expedientes y normalizar 23,722 calificaciones transaccionales en un repositorio relacional unificado. El acoplamiento de esta infraestructura de datos con un tablero de control visual (Dashboard) elimina la deficiencia en el procesamiento de la información, proporcionando a la institución un artefacto tecnológico objetivo y accionable para diagnosticar el rezago académico e impulsar la eficiencia terminal.

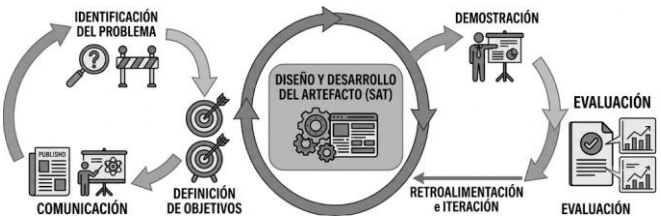
II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Instanciación del marco metodológico Design Science Research (DSR) y CRISP-DM

El rigor científico para la construcción de este sistema de minería visual se fundamenta en una arquitectura metodológica dual que busca acercar la tecnología a las necesidades reales de los docentes. En un primer nivel, la investigación adopta el paradigma de *Design Science Research* (DSR). Este modelo se enfoca en la creación y evaluación empírica de artefactos tecnológicos diseñados para resolver problemas organizacionales complejos. En el entorno de la educación superior, aplicar DSR asegura que el desarrollo del software no sea un simple ejercicio de programación, sino una respuesta genuina a los retos que enfrentan las academias de ingeniería.
Para gobernar el procesamiento analítico de los historiales académicos y dar un orden estandarizado a la ingeniería de datos, el núcleo de la herramienta se estructuró apoyándose en la metodología *Cross Industry Standard Process for Data Mining* (CRISP-DM). Investigaciones recientes en analítica educativa confirman que aplicar CRISP DM garantiza que la transición de registros aislados a plataformas de diagnóstico se realice de forma íntegra y libre de sesgos metodológicos (Carneiro et al., 2022). De esta forma, mientras el enfoque DSR garantiza que el sistema completo sea útil para la institución, las fases de preparación de CRISP DM orientan paso a paso la construcción del proceso de Extracción, Transformación y Carga (ETL).
Para comprobar que esta propuesta es verdaderamente viable, el diseño de la investigación estableció métricas de evaluación.

La eficacia técnica del artefacto se evalúa observando el rendimiento computacional del proceso ETL, teniendo como meta principal lograr la automatización total en la limpieza de los expedientes. El sistema asume el reto de procesar y normalizar miles de calificaciones, reduciendo el tiempo de espera administrativo, el cual tradicionalmente consume semanas enteras de trabajo manual, a un proceso que se completa en cuestión de segundos. Alcanzar esta agilidad es fundamental para que el tablero visual interactivo pueda responder de inmediato y facilitar la toma de decisiones para frenar la deserción a tiempo mediante evidencia paramétrica (Bustamante et al., 2024). El proceso puede visualizarse en la Figura 1.

Figura 1
Ciclo metodológico de Design Science Research aplicado al desarrollo del artefacto. Fuente: Elaboración Propia



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID071

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

2.2 Especificación y alcance del artefacto computacional

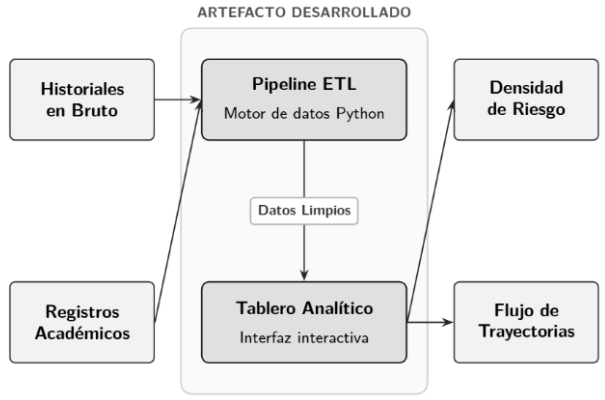
La resolución de la fragmentación operativa descrita exige la construcción de un artefacto tecnológico bidimensional que actúe directamente sobre el flujo de información institucional. La propuesta se compone de un motor de procesamiento backend desarrollado en Python y una interfaz web interactiva orientada a la toma de decisiones. Este diseño permite que el flujo de información transite de manera fluida entre el almacenamiento en bruto y la visualización estratégica, eliminando por completo la necesidad de intervenciones manuales o cruces tradicionales en hojas de cálculo por parte de las academias.

El núcleo operativo del artefacto delimita sus funciones con precisión algorítmica para garantizar la viabilidad del sistema dentro de las restricciones de la organización. El backend asume la responsabilidad exclusiva de ejecutar las tareas de extracción, transformación y carga (ETL), unificando los expedientes históricos de las generaciones fundadoras en una estructura relacional única y longitudinal. Por su parte, el componente de analítica visual traduce estos conjuntos de datos depurados en componentes gráficos interactivos, empleando estimaciones de densidad estadística y diagramas jerárquicos.

La herramienta dota al usuario de capacidades de exploración multivariable, permitiéndole segmentar el rendimiento académico por cohortes, ciclos escolares y líneas curriculares específicas mediante una navegación intuitiva que mitiga la carga cognitiva del docente.

El sistema desarrollado en esta etapa se concentra exclusivamente en las dimensiones descriptivas y diagnóstica del análisis de trayectorias escolares. De este modo, el artefacto se establece como el cimiento tecnológico indispensable; una infraestructura analítica sólida que transforma los registros históricos pasivos en conocimiento táctico inmediato antes de abordar la complejidad de la analítica prescriptiva cuya arquitectura se ve en la Figura 2.

Figura 2
Estructura del alcancel del artefacto. Fuente: Elaboración Propia



2.3 Arquitectura del sistema y desarrollo de los procesos ETL

El núcleo técnico de la solución propuesta se centra en el diseño e implementación de una arquitectura computacional orientada a automatizar la ingesta y el refinamiento de la información escolar. La problemática inicial en los repositorios institucionales radicaba en su naturaleza estrictamente transaccional, dispersa y no estructurada. Los registros históricos de las asignaturas procedían principalmente de archivos de texto plano (Bloc de notas) y hojas de cálculo irregulares fragmentadas entre silos administrativos, como se ve en la Figura 3.

Figura 3
Ejemplo de información en bloc de notas. Fuente: Elaboración Propia

```
--------------------------------------------------------------------------------
Num.Control : 16231010          Nombre : ACOSTA SANCHEZ ANGEL ARMANDO
Semestre : 1                 Carrera : INGENIERIA EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

ACF0901  CALCULO DIFERENCIAL                      5       84          1erCur-1erOport00
ACA0907  TALLER DE ETICA                          4       81          1erCur-1erOport00
SAB1317  FUNDAMENTOS DE DIBUJO                    5       10          1erCur-2daOport00

Promedio : 59.50
```

A pesar de su complejidad sintáctica, la extracción y procesamiento de estos archivos de texto resultaba crítica y obligatoria para el éxito del modelo, ya que representaban la única fuente disponible donde residían variables analíticas indispensables para la reconstrucción longitudinal de las trayectorias: la oportunidad o tipo de evaluación en que el alumno cursó y acreditó la materia (v.g., ordinario, extraordinario o recursamiento), el semestre cronológico exacto y la identidad del docente que impartió la asignatura, entre otros metadatos operativos esenciales.

Estos reportes crudos carecían de delimitadores computacionales estándar como comas o tabulaciones uniformes, presentando estructuras complejas orientadas originalmente a la impresión física o la interpretación visual humana, lo que volvía inoperante su análisis estadístico directo. Ejemplo de otro archivo es el visto en la Figura 4.

Figura 4
Información de acuerdo con la materia. Fuente: Elaboración Propia

```
CARRERA : 10   ING SIST AUTOM   ISAU-2013-240                    PERIODO : AGO-DIC-2016
MATERIA : SAB1317   FUNDAMENTOS DE DIBUJO
MAESTRO : 297 - JORGE LUIS HERNANDEZ MAÑON                      GRUPO : 5B1A
HORARIO : Lu 12:00-13:00-LC4 Ma 12:00-13:00-LC4 Mi 12:00-13:00-LC4
NO.  CONTROL   NOMBRE DEL ALUMNO                    1OP     2OP
 1|  16231010  |ACOSTA SANCHEZ ANGEL ARMANDO        |       |  NA   |
 2|  16231499  |AGUILAR PINEDA JOAQUIN              |  78   |       |
```

Para superar este escenario de severa heterogeneidad estructural, se seleccionó Python como el motor analítico principal del backend asíncrono, programando rutinas capaces de procesar la varianza de los formatos de salida originales y centralizar la información.

La fase de transformación constituyó el desafío metodológico y computacional más complejo dentro del *pipeline* de datos. Los métodos aplicados consistieron en el desarrollo de scripts robustos apoyados en las librerías Pandas y NumPy para limpiar el ruido operativo acumulado durante los ciclos escolares de las generaciones fundadoras.

El proceso requirió realizar un *parsing* secuencial explicado en la Figura 6 basado en espaciados dinámicos para extraer las variables independientes aisladas en el encabezado de los bloques de texto plano y mapearlas de forma longitudinal bajo una llave primaria única (el número de control del alumno).

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID071

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

2.4 Arquitectura del Pipeline ETL y Coincidencia Difusa

El núcleo técnico de la solución se centra en una arquitectura computacional programada en Python, diseñada específicamente para automatizar la ingesta y el refinamiento masivo de la información escolar. Para este estudio, la infraestructura procesó de manera asíncrona un censo de 961 expedientes históricos y 23,722 calificaciones transaccionales correspondientes a las generaciones fundadoras. La problemática inicial radicaba en la naturaleza dispersa y no estructurada de los repositorios institucionales, donde los historiales provenían de archivos de texto plano y hojas de cálculo irregulares, fragmentadas entre distintos departamentos administrativos.

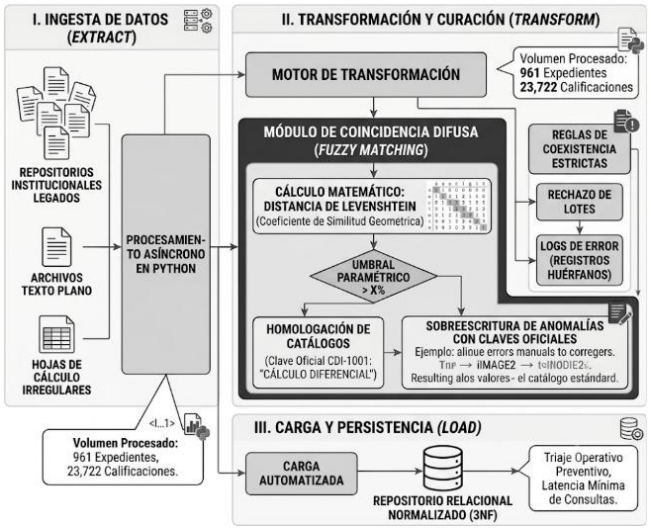
A pesar de su complejidad sintáctica, el procesamiento automatizado de estos documentos resultaba obligatorio, ya que contenían las variables analíticas indispensables para reconstruir longitudinalmente las trayectorias: oportunidades de acreditación, semestres cronológicos exactos y la identidad del docente evaluador. El diseño del artefacto resolvió esta heterogeneidad acotando su alcance exclusivamente a la limpieza, transformación y persistencia de los datos, estableciendo una base sólida para la analítica posterior.

En los sistemas legados universitarios, es común encontrar una alta varianza operativa en los nombres de las asignaturas y docentes debido a errores de captura manual acumulados a lo largo de los años. Para resolver esto sin recurrir a una depuración manual exhaustiva, se implementó un algoritmo de coincidencia difusa (Fuzzy Matching) fundamentado en el cálculo matemático de la distancia de Levenshtein (Cardona et al., 2023). El algoritmo calcula un coeficiente de similitud y, al superar un umbral paramétrico de confianza, sobrescribe la anomalía con la clave institucional oficial unificada.

El motor fue programado para aplicar reglas de coexistencia estrictas, rechazando lotes de información si los expedientes carecían de variables conjuntas obligatorias, garantizando así la integridad analítica. La Figura 5 muestra la arquitectura utilizada.

Figura 5

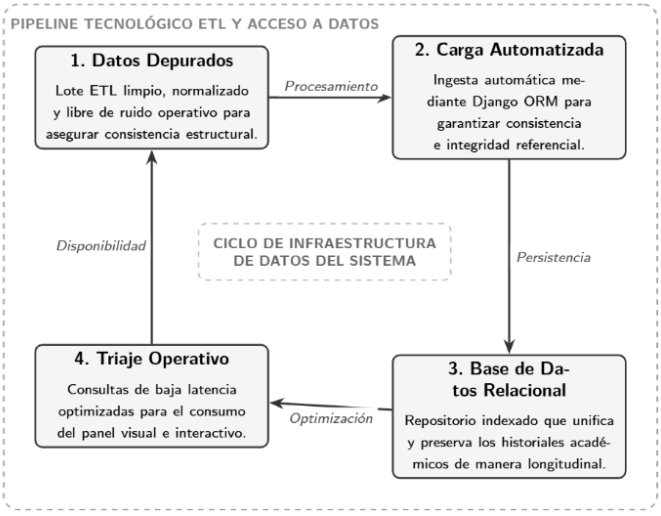
Arquitectura del esquema de coincidencias. Fuente: Elaboración Propia



La etapa de carga consolida de manera automática los registros completamente depurados y normalizados dentro de un repositorio relacional integrado en el entorno web de Django. Al almacenar la información bajo una estructura indexada y libre de ruido operativo, el sistema garantiza la integridad referencial de los historiales académicos a lo largo de la línea del tiempo. Este diseño técnico optimiza el rendimiento del backend para soportar consultas complejas de baja latencia directamente desde la interfaz gráfica, proveyendo un cimiento de datos estable, auditable y de alta disponibilidad para el triaje académico operativo. De este modo, el *pipeline* ETL se establece como la infraestructura analítica fundamental que transforma el rezago de los archivos en bruto en un activo dinámico, listo para ser consumido por los componentes de exploración visual interactiva. Este proceso se ilustra en la Figura 6.

Figura 6

Arquitectura del flujo de persistencia, integridad y consumo para el triaje operativo. Fuente: Elaboración Propia



Este desacoplamiento técnico garantiza consultas inmediatas en la interfaz gráfica del panel de control, proveyendo un cimiento limpio, estable y auditable para el triaje académico operativo.

2.5 Diseño del modelo de datos relacional y esquema de entidades

Una vez concluido el proceso de extracción y unificación en el pipeline de Python, el diseño arquitectónico exige estructurar la persistencia de la información de manera eficiente. Los archivos transaccionales de origen presentan una naturaleza redundante y desnormalizada, replicando los datos del alumno de forma indeterminada en cada ciclo escolar. Para resolver esta deficiencia y garantizar la integridad referencial del sistema, se construyó un esquema de base de datos relacional alineado con los principios de la Tercera Forma Normal (3NF).

Este nivel de normalización erradica las dependencias transitivas y aísla los componentes del entorno escolar en entidades independientes, lo cual optimiza el rendimiento de las consultas y reduce drásticamente el espacio de almacenamiento físico. Diversas investigaciones en arquitectura

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID071

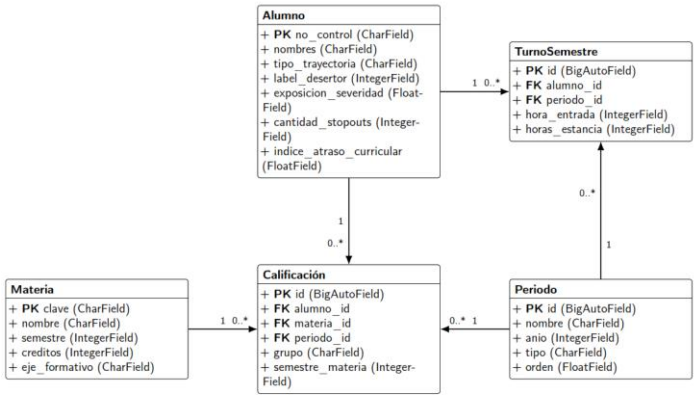
This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

de información establecen que transitar de silos administrativos a almacenes normalizados resulta indispensable para sostener aplicaciones analíticas sin comprometer la consistencia de las transacciones (Elmasri & Navathe, 2010).

La orquestación de este esquema lógico se implementó mediante el Mapeo Objeto Relacional (ORM) del entorno web de Django. Esta tecnología abstrae la complejidad de las consultas y consolida el catálogo de asignaturas, la plantilla docente y el perfil demográfico del estudiante en entidades interconectadas. El núcleo analítico del sistema converge en una entidad asociativa que resguarda el contexto longitudinal de la trayectoria, registrando variables críticas como la calificación numérica final, el periodo cronológico y la oportunidad de acreditación. El diagrama UML de la base de datos se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Diagrama UML del Sistema. Fuente: Elaboración Propia



La estructura definió tres entidades fundamentales interconectadas: *Alumno*, *Asignatura* y *Docente*. La entidad *Alumno* se estableció utilizando el número de control institucional (boleta) como llave primaria única, conteniendo los atributos demográficos y el estatus general del estudiante. Por su parte, la entidad *Asignatura* centralizó el catálogo oficial de materias del plan de estudios de ingeniería empleando la clave oficial de la retícula curricular como identificador, lo que resolvió de manera definitiva el problema de las variaciones nominales detectadas en las fases previas de la extracción. La relación de muchos a muchos (*Many-to-Many*) existente entre estudiantes y asignaturas se resolvió mediante la construcción de la entidad asociativa denominada *HistorialAcadémico*.

La entidad asociativa *HistorialAcadémico* constituye el núcleo analítico de la base de datos, ya que es el punto exacto donde convergen los flujos lógicos de la información y donde se aloja el contexto de la trayectoria. Cada registro en esta tabla representa un evento de inscripción único y se vincula mediante llaves foráneas (*Foreign Keys*) a un alumno, una asignatura y al docente específico que impartió la clase.

Para asegurar la velocidad de respuesta del tablero analítico web y mitigar las latencias durante la renderización de las estimaciones de densidad y diagramas de flujo, se implementaron índices compuestos en la base de datos sobre los campos de control combinados de alumno, asignatura y periodo, permitiendo que la interfaz interactiva recupere décadas de historiales de las generaciones fundadoras en milisegundos.

2.6 Componentes de analítica visual y diseño de la interfaz

El diseño de la interfaz de usuario (UI) y el desarrollo de la experiencia de usuario (UX) se centraron rigurosamente en el principio de eficiencia cognitiva para la gestión escolar y el seguimiento de trayectorias. Para mitigar la fatiga informativa y evitar la saturación de tablas de datos crudos, el frontend del artefacto se construyó sobre el framework de diseño Bootstrap en su versión 5.3.2, aprovechando su sistema de rejilla flexible para garantizar una respuesta adaptativa óptima en múltiples dispositivos.

El sistema tipográfico ejerce una función de control estructurado: la familia *Inter* se seleccionó para los cuerpos de texto y narrativas por su elevada legibilidad en pantallas de alta densidad de píxeles, mientras que, para los identificadores numéricos, claves de control estudiantil y registros de calificaciones se implementó la fuente monoespaciada *JetBrains Mono*, reduciendo significativamente el error humano durante la consulta rápida de datos transaccionales. Para consolidar la apropiación tecnológica, se integró una hoja de estilos personalizada (sat.css) que alinea la paleta cromática con los valores institucionales del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo (ITSL) y del Tecnológico Nacional de México (TecNM). Como se detalla formalmente en la paleta de diseño de la Figura 8, el entorno visual distribuye sus propiedades cromáticas bajo una jerarquía estricta: un azul institucional base (#1A1A2E) estructurado en la barra de navegación lateral y los encabezados primarios para transmitir estabilidad; un azul secundario e interactivo (#2980B9) implementado en botones de acción primaria (*btn-sat-primary*) e indicadores de progreso; tonalidades carmesí y rojo de alerta (#C0392B y #8E232E) reservadas para umbrales de riesgo crítico; un verde de aprobación (#2D9A4E) asociado a trayectorias estables; y un dorado o naranja preventivo (#E67E22) empleado para variables de riesgo medio o rezago latente. Esta identidad visual da soporte a una arquitectura de *frontend* basada en un modelo de herencia de plantillas de Django, reduciendo la redundancia de código HTML.

Figura 8

Paleta de colores utilizada en el diseño de la interfaz. Fuente: Elaboración Propia

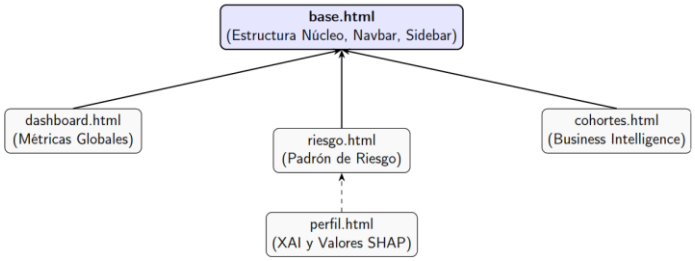


El archivo maestro base.html actúa como el armazón estructural, conteniendo el menú lateral de acceso rápido y la barra de navegación superior fija, permitiendo que las vistas analíticas especializadas (dashboard.html, riesgo.html, cohortes.html y perfil.html) extiendan dinámicamente este núcleo analítico central. La estructura se ve en la Figura 9.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID071

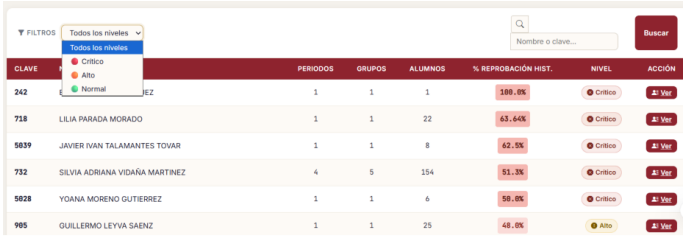
This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 9
Topología de herencia de plantillas. Fuente: Elaboración Propia



Las peticiones son dirigidas por el enrutador hacia la capa de negocio (*views.py*), donde los *QuerySets* de Django consultan el repositorio relacional de manera asíncrona, inyectando diccionarios de contexto serializados en formato *JSON* hacia las plantillas.
El componente visual más innovador implementado mediante esta transferencia de datos es el mecanismo de clasificación cromática de riesgo. Mediante etiquetas personalizadas (*templatetags*) y lógica condicional de plantillas, la interfaz procesa las variables de trayectoria y les asigna reglas CSS condicionales directamente en las vistas del padrón de riesgo (*riesgo.html*) y el directorio docente (*lista.html*), forzando una evaluación donde el ojo humano del usuario clasifica el nivel de vulnerabilidad por el color antes de procesar el texto numérico.
Como se ejemplifica en la Figura 10, la interfaz dispara en rojo intenso ante índices críticos de atraso curricular superiores a tres o promedios deficientes en asignaturas Gatekeepers; el color dorado para riesgos latentes; e inyecta las clases en tonalidades verdes para trayectorias estables. Esta automatización suprime la ceguera institucional e individual, optimizando el flujo de trabajo tutorial al priorizar la atención de los focos rojos sin requerir revisiones manuales previas.

Figura 10
Topología de herencia de plantillas. Fuente: Elaboración Propia

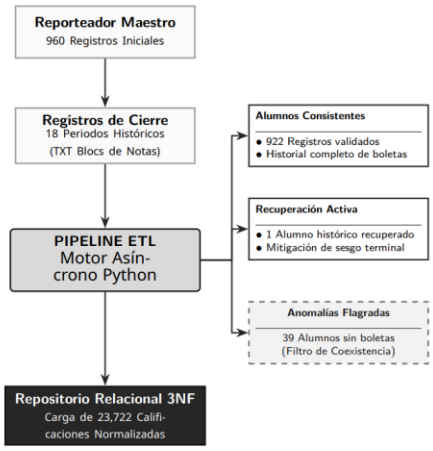


III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Eficiencia operativa y rendimiento computacional del pipeline ETL

La evaluación del artefacto tecnológico comenzó con la validación cuantitativa de la infraestructura informático-analítica encargada de la ingesta y purificación de datos. El procesamiento automatizado abarcó un horizonte temporal de 18 periodos semestrales consecutivos (desde el ciclo de apertura en agosto-diciembre de 2016 hasta agosto-diciembre de 2025), consolidando una masa crítica de información transaccional histórica perteneciente a la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo (ITSL).
En términos de eficiencia operativa, los resultados revelaron una reducción observada de la latencia administrativa institucional. El método manual artesanal utilizado históricamente por las coordinaciones y el personal de apoyo, basado en el cruce celda por celda de reportes aislados y hojas de cálculo desnormalizadas, demandaba semanas enteras de labor burocrática para compilar de forma longitudinal una sola cohorte.
En contraste, la ejecución integrada del pipeline en Python resolvió de manera asíncrona la lectura secuencial, el parsing sintáctico y el balanceo matricial de la totalidad de los ciclos escolares en un tiempo de ejecución inmediato medido en segundos, devolviendo la capacidad de triaje proactivo a la organización antes de que concluyan los periodos críticos de deserción temprana. Este proceso se ve en la Figura 11.

Figura 11
Flujo volumétrico y resultados de auditoría computacional del pipeline ETL. Fuente: Elaboración Propia

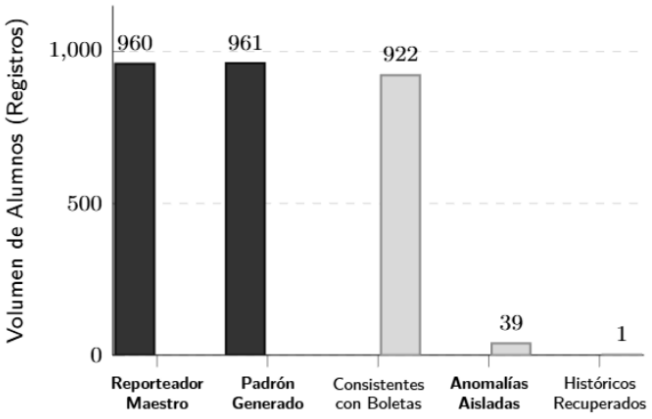


El rigor algorítmico del *backend* se constató en su capacidad de auditoría y diagnóstico preventivo durante la fase de transformación de los datos oscuros. Al procesar el padrón demográfico inicial compuesto por 960 registros provenientes del reporteador maestro, el motor ETL detectó discrepancias críticas de integridad referencial respecto a los archivos transaccionales de texto plano (*AUTO BOLETAS.txt*) y de actas por materia (*AUTO CALIFICACIONES FINALES.txt*). El sistema identificó un subconjunto de 922 alumnos con historiales de cursamiento completamente consistentes y estables.
No obstante, la principal contribución informática para mitigar el sesgo de supervivencia en los modelos analíticos fue la recuperación dinámica de alumnos históricos que habían causado baja definitiva previa al corte administrativo actual, insertándolos de forma automatizada en el padrón oficial generado (elevando la matrícula de análisis a 961 registros) con su respectiva etiqueta de deserción activa. De manera simultánea, el filtro de correspondencia conjunta obligatoria aisló y marcó a 39 "alumnos fantasmas" cuyos folios de matrícula carecían de registros de inscripción o boletas reales en los servidores, emitiendo *logs* de error estructurados que protegen al software de sesgos en el aprendizaje computacional. El resumen de los datos obtenidos en alumnos se muestra en la gráfica de la Figura 12.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID071

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 12
Resumen estadístico de datos de alumnos: Elaboración Propia



3.2 *Diagnóstico longitudinal de cohortes fundadoras e inestabilidad docente*

La disponibilidad de un repositorio relacional estructurado en tercera forma normal (3NF) que integró un volumen masivo de 23,722 registros de calificaciones individuales asociados a una matrícula longitudinal de 961 alumnos y una plantilla histórica de 106 docentes a lo largo de 18 periodos académicos, permitió realizar la primera auditoría retrospectiva de las trayectorias de Ingeniería en Sistemas Automotrices en el ITSL. La problemática del alto abandono temprano en las generaciones fundadoras (que tradicionalmente se atribuía de forma simplista a la falta de vocación estudiantil o a deficiencias socioeconómicas) pudo ser reevaluada científicamente mediante los módulos de analítica visual.

Al cruzar las variables temporales y de rendimiento con la identidad de la plantilla de profesores, el artefacto demostró que el fenómeno de la deserción estuvo fuertemente condicionado por factores estructurales internos de la organización, específicamente por la severidad académica acumulada en asignaturas iniciales y la alta inestabilidad de la plantilla docente durante los años de consolidación de la carrera.

El análisis cuantitativo de las trayectorias aisló un total de 136 asignaturas-docente catalogadas como de alto riesgo o criticidad severa, comúnmente denominadas asignaturas *Gatekeepers*. Estas materias, caracterizadas por registrar índices de reprobación muy superiores a la media institucional del 18.94% (alcanzando promedios del 30.37% en el nivel de riesgo alto y un alarmante 62.44% en el nivel crítico), actúan como verdaderos filtros que modifican el flujo normal de las cohortes.

Como se ilustra en el comportamiento semestral de la Figura 13, esta barrera académica no se distribuye de manera uniforme, sino que se concentra dramáticamente en los tres primeros semestres de la carrera.

El primer semestre registra la mayor acumulación con 33 casos críticos de asignaturas Gatekeepers, seguido por el tercer semestre con 20 casos, coincidiendo con la transición hacia las ciencias básicas de la ingeniería. De los 106 docentes evaluados en el histórico, el sistema identificó que una población selecta de 37 profesores únicos estuvo a cargo de impartir estas asignaturas de alta reprobación, exponiendo de forma sistemática a los estudiantes a un entorno de alta fricción curricular durante su periodo de inducción universitaria.

La inestabilidad de la plantilla docente en estas asignaturas fundamentales constituyó una de las causas del rezago longitudinal. Mediante el rastreo temporal de los identificadores de docentes recuperados de las actas de examen, el artefacto comprobó que, en las primeras generaciones, asignaturas críticas como *Cálculo Diferencial* (Semestre 1) y *Estática* (Semestre 3) fueron impartidas por docentes con altos índices de rotación o contratación transitoria. Esto se resume en el diagrama de la Figura 14.

Figura 13
Distribución semestral de los 136 cursos detectados como asignaturas de alto riesgo y criticidad docente. Fuente: Elaboración Propia

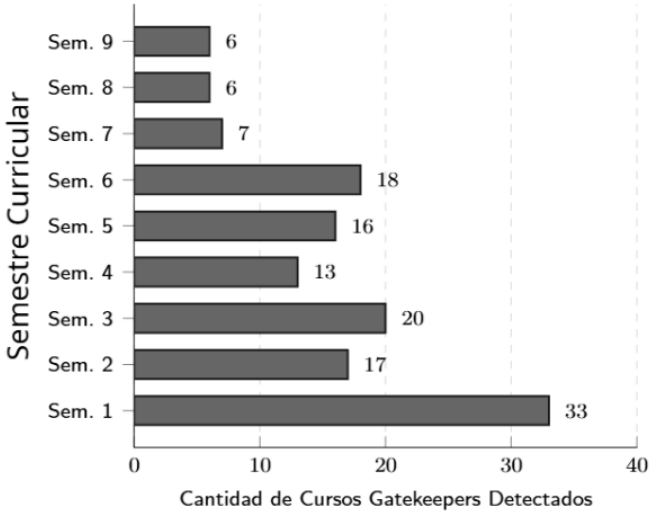
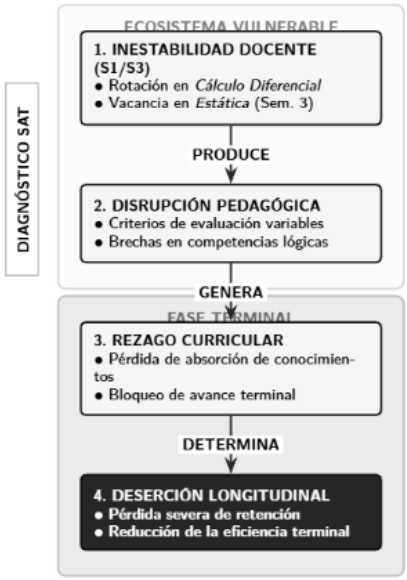


Figura 14
Impacto de la inestabilidad docente en los primeros semestres sobre la eficiencia terminal. Fuente: Elaboración Propia



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID071

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

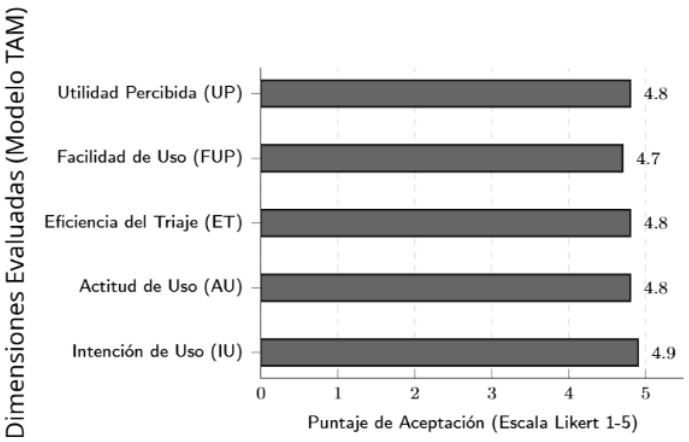
Al no existir una continuidad pedagógica, el rendimiento de los grupos fluctuó de manera severa entre semestres consecutivos, generando un rezago acumulativo en la adquisición de competencias lógicas básicas. Al llegar a semestres avanzados, este desfase curricular se tradujo en una incapacidad de absorción académica, impactando directamente en la retención terminal. De este modo, la analítica del SAT demostró que el abandono escolar de las generaciones fundadoras no fue un suceso aislado, sino el resultado de un ecosistema académico vulnerable donde la inestabilidad en la asignación docente de los primeros semestres debilitó sistemáticamente las trayectorias escolares.

3.3 Evaluación de usabilidad y utilidad operativa con usuarios expertos

La validación del artefacto computacional bajo el marco metodológico de Design Science Research (DSR) requirió evaluar no solo la precisión de su backend, sino también su utilidad operativa y facilidad de uso en un entorno organizativo real. Para este propósito, se implementó un protocolo de evaluación sistemático mediante un grupo de enfoque (focus group) compuesto por diez usuarios participantes de la comunidad académica del ITSL, integrando de manera estratégica a docentes pertenecientes a la academia de Ingeniería en Sistemas Automotrices, al personal de la jefatura de carrera y a una muestra seleccionada de alumnos vigentes de la misma especialidad. La incorporación activa de los estudiantes en este proceso se realizó con la firme intención de que percibieran de forma directa, visual e interactiva el estado real de su trayectoria escolar y el comportamiento general de su carrera a lo largo de los ciclos cursados. El proceso de evaluación se dividió en dos fases: una sesión de interacción guiada con el panel de control utilizando los datos reales ya depurados de las generaciones fundadoras, seguida de la aplicación de un instrumento de recolección de datos cuantitativo basado en la adecuación del Modelo de Aceptación Tecnológica (TAM) y la Escala de Usabilidad del Sistema (SUS).

El análisis cuantitativo de la dimensión de usabilidad arrojó un puntaje de evaluación sobresaliente, alcanzando un valor promedio de 87.5 en la escala SUS, lo que posiciona al software en la categoría de usabilidad "Excelente" (Aceptabilidad Alta). Los docentes, la jefatura de carrera y los estudiantes coincidieron de forma unánime en que la unificación de la interfaz bajo una hoja de estilos común (sat.css) y el modelo de herencia de plantillas (base.html) suprimen por completo el esfuerzo de navegación errática característico de los sistemas tradicionales. Como se ilustra en el desglose dimensional de la Figura 15, las variables evaluadas mediante el modelo TAM confirmaron que la Utilidad Percibida (UP) y la Facilidad de Uso Percibida (FUP) obtuvieron valoraciones promedio de 4.8 y 4.7, respectivamente, sobre una escala Likert de 5 puntos.

Figura 15
Resultados cuantitativos de la evaluación de aceptación tecnológica (TAM). Fuente: Elaboración Propia



IV. CONCLUSIONES

El estudio permitió diseñar y evaluar un artefacto computacional para integrar, depurar y visualizar información académica de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. La articulación de Design Science Research con el proceso CRISP-DM proporcionó una estructura metodológica para transformar registros institucionales heterogéneos en un repositorio relacional orientado al análisis longitudinal de las trayectorias escolares. El sistema procesó 23,722 registros de calificaciones correspondientes a 961 estudiantes, 106 docentes y 18 periodos académicos comprendidos entre 2016 y 2025.

La auditoría del proceso ETL mostró que, de los 960 registros procedentes del reporteador maestro, 922 contaban con historiales consistentes, 39 presentaban anomalías de correspondencia y un registro histórico fue recuperado e incorporado al padrón de análisis. Estos resultados evidencian la capacidad del artefacto para identificar inconsistencias de integridad y consolidar información dispersa. No obstante, el desempeño computacional debe interpretarse con cautela, ya que en esta etapa no se documentaron el tiempo exacto de ejecución, su variabilidad entre repeticiones, el porcentaje de automatización ni métricas de precisión calculadas frente a un conjunto de referencia. Por ello, los resultados respaldan la funcionalidad operativa del sistema, pero no permiten establecer todavía su superioridad respecto de otros procedimientos de procesamiento de datos.

El análisis descriptivo identificó 136 combinaciones asignatura-docente clasificadas en niveles de riesgo alto o crítico. La reprobación institucional promedio fue de 18.94 %, mientras que las combinaciones clasificadas en riesgo alto y crítico presentaron promedios de 30.37 % y 62.44 %, respectivamente. La mayor concentración se observó en el primer semestre, con 33 casos, seguida del tercero, con 20.

Asimismo, 37 de los 106 docentes registrados estuvieron asociados con estas asignaturas durante el periodo analizado. En conjunto, los hallazgos muestran una asociación entre la reprobación en asignaturas iniciales, la variación en la asignación docente y la acumulación de rezago curricular.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID071

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Debido al carácter retrospectivo y descriptivo del estudio, esta relación no debe interpretarse como evidencia causal; factores académicos, personales, económicos e institucionales no incorporados al análisis también podrían intervenir en la deserción.

La evaluación con diez integrantes de la comunidad académica aportó evidencia inicial sobre la aceptación del sistema. La puntuación promedio de 87.5 en la Escala de Usabilidad del Sistema indicó una valoración favorable de la interfaz. De manera complementaria, las dimensiones del Modelo de Aceptación Tecnológica obtuvieron promedios de entre 4.7 y 4.9 en una escala de cinco puntos.

Estos resultados sugieren que la visualización de trayectorias y la clasificación cromática por niveles de riesgo pueden facilitar la consulta de información y la priorización de casos. Sin embargo, el tamaño reducido y la selección intencional de los participantes limitan la generalización de los resultados; también se requiere informar la variabilidad de las respuestas y evaluar el sistema con grupos de usuarios más amplios y diferenciados.

En consecuencia, la principal aportación del trabajo consiste en una infraestructura informática que integra datos escolares longitudinales y los convierte en información diagnóstica para apoyar la gestión académica. Su alcance actual es descriptivo y diagnóstico. Como trabajo futuro, se propone realizar pruebas controladas de rendimiento con tiempos exactos y múltiples ejecuciones; calcular porcentajes de automatización y métricas de precisión mediante datos previamente etiquetados; evaluar la confiabilidad de los instrumentos de aceptación; ampliar la validación a otras cohortes, carreras e instituciones; y analizar longitudinalmente si las intervenciones derivadas del sistema se relacionan con mejoras en la retención y la eficiencia terminal.

Estas acciones permitirán determinar con mayor rigor la reproducibilidad, validez externa y utilidad institucional del artefacto.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Dgo., especialmente a la División de Ingeniería en Sistemas Automotrices y a la Subdirección de Posgrado e Investigación por las facilidades dadas para esta investigación.

VI. REFERENCIAS

Brooke, J. (2013). SUS: A retrospective. Journal of Usability Studies, 8(2), 29–40. http://uxpajournal.org/wp-content/uploads/sites/7/pdf/JUS_Brooke_February_2013.pdf

Bustamante, A., Valdivia, L., & García, M. (2024). Data mining to identify university student dropout factors. Applied Sciences, 14(7), 2423. https://doi.org/10.3390/app14072423

Cardona, M. A., Cudney, E. A., & Snyder, J. E. (2023). Predicting student retention using support vector machines and random forests. Engineering Management Journal, 35(1), 1–13. https://doi.org/10.1080/10429247.2022.2043336

Carneiro, M. G., Dutra, B. L., Paiva, J. G. S., Gabriel, P. H. R., & Araújo, R. D. (2022). Educational data mining to support identification and prevention of academic retention and dropout: a case study in introductory programming. Revista Brasileira de Informática na Educação, 30, 379–395. https://doi.org/10.5753/rbie.2022.2518

Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique. Journal of Artificial Intelligence Research, 16, 321–357. https://doi.org/10.1613/jair.953

Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. MIS Quarterly, 13(3), 319–340. https://doi.org/10.2307/249008

Holovaty, A., & Kaplan-Moss, J. (2009). The definitive guide to Django: Web development done right (2nd ed.). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4302-1937-8

Keim, D. A., Mansmann, F., Schneidewind, J., Thomas, J., & Ziegler, H. (2008). Visual analytics: Scope and challenges. In Visual Data Mining (pp. 76–90). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71017-2_6

Lundberg, S. M., Erion, G., Chen, H., DeGrave, A., Prutkin, J. M., Nair, B., Katz, R., Himmelfarb, J., Bansal, N., & Lee, S.-I. (2020). From local explanations to global understanding with explainable AI for trees. Nature Machine Intelligence, 2(1), 56–67. https://doi.org/10.1038/s42256-020-0143-6

Macfadyen, L. P., & Dawson, S. (2010). Mining LMS data to develop an “early warning system” for educators: A proof of concept. Computers & Education, 54(2), 588–599. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2009.09.008

Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. Journal of Management Information Systems, 24(3), 45–77. https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302

Romero, C., & Ventura, S. (2020). Educational data mining and learning analytics: An updated survey. Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, 10(3), Article e1355. https://doi.org/10.1002/widm.1355

Tinto, V. (1975). Dropout from higher education: A theoretical synthesis of recent research. Review of Educational Research, 45(1), 89–125. https://doi.org/10.3102/00346543045001089

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización [Conceptualization]	Eduardo Machado Díaz
2	Curación de datos [Data curation]	Eduardo Machado Díaz
3	Análisis formal [Formal analysis]	Arturo Serrano Hernández
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Arturo Serrano Hernández
5	Investigación [Investigation]	Eduardo Machado Díaz
6	Methodología [Methodology]	Eduardo Machado Díaz.
7	Administración del proyecto [Project administration]	Diego Alberto Román Landeros
8	Recursos [Resources]	Diego Alberto Román Landeros
9	Software [Software]	Eduardo Machado Díaz
10	Supervision [Supervision]	Diego Alberto Román Landeros
11	Validación [Validation]	Arturo Serrano Hernández
12	Visualización [Visualization]	Eduardo Machado Díaz
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Eduardo Machado Díaz
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Arturo Serrano Hernández

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID071

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

La Importancia de la Evaluación Educativa en la Región Laguna, Durango: Fundamentos Técnicos y Evidencia Empírica del Pilotaje 2025–2026.

The Importance of Educational Assessment in the Laguna Region, Durango: Technical Foundations and Empirical Evidence from the 2025–2026 Pilot Study

Adame-de León, F.U.[1]; Moreno-Núñez, E.[2] ✉; Garza-Rosales, G.J.[3]; Miranda-Guardado, C.[4]; García-Morales, O.[5]

Datos de Adscripción:

[1] Adame de León, Fernando Ulises.
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Torreón, Coahuila. México.
u.adame@yahoo.com.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5973-3339

[2] ✉ Moreno Núñez, Elda.
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
elda.mn@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5912-082X

[3] Garza Rosales, Gerardo de Jesús
Subsecretaría de Educación Región Laguna, Durango, México
gjgarzarosales@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2641-6402

[4] Miranda Guardado, César.
Subsecretaría de Educación Región Laguna, Durango. Dirección de educación básica. Gómez Palacio, Durango. México
cmg720629@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6303-234X

[5] García Morales, Olivia
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Torreón, Coah. México
gm.olivia@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4208-0122

.

Resumen **- La evaluación educativa constituye un eje estratégico para la mejora continua de los sistemas escolares. En México, los marcos normativos actuales enfatizan la evaluación como herramienta para fortalecer la calidad educativa; en este contexto, se implementó el Proyecto Evaluación Región Laguna 2025–2026, con el objetivo de generar información diagnóstica contextualizada. En el estudio se analiza la importancia de la evaluación en la Región Laguna de Durango, a partir del pilotaje del instrumento de evaluación regional aplicado durante el ciclo escolar 2025–2026. Se utilizó un diseño cuantitativo descriptivo-analítico con un enfoque psicométrico. La muestra estuvo conformada por 1,373 estudiantes de educación básica primaria y secundaria. El instrumento incluyó reactivos alineados con el plan de estudios vigente, y se aplicaron análisis de confiabilidad y consistencia mediante el alfa de Cronbach, el coeficiente Kuder-Richardson 20 y el modelo de Rasch. Los resultados muestran áreas críticas en matemáticas y debilidades en la comprensión lectora y en la producción escrita. Los hallazgos confirman la necesidad de fortalecer las estrategias de intervención focalizadas. Se concluye que la evaluación educativa regional se consolida como una herramienta estratégica para orientar las decisiones pedagógicas con base en evidencia cuantitativa y constituye un mecanismo clave para la mejora continua; el uso de fundamentos psicométricos robustos fortalece la validez de dichas decisiones.**

Palabras Clave **- Análisis psicométrico, Calidad Educativa, Evaluación Educativa, Evaluación Región Laguna, Resultados de Aprendizaje.**

Abstract **- Educational assessment constitutes a strategic pillar for the continuous improvement of school systems. In Mexico, current regulatory frameworks emphasize assessment as a tool to strengthen educational quality; in this context, the Laguna Region Assessment Project 2025–2026 was implemented to generate contextualized diagnostic information. This study analyzes the importance of assessment in the Laguna Region of Durango based on the pilot testing of the regional assessment instrument administered during the 2025–2026 academic year. The study employed a descriptive-analytical quantitative design with a psychometric approach. The sample comprised 1,373 primary and secondary students. The instrument included items aligned with the current curriculum, and reliability and consistency analyses were conducted using Cronbach's alpha, the Kuder–Richardson 20 coefficient, as well as analyses based on the Rasch Model. The results reveal critical areas in mathematics and weaknesses in reading comprehension and written production. The findings confirm the need to strengthen targeted intervention strategies. The study concludes that regional educational assessment is a strategic tool for guiding evidence-based pedagogical decision-making and a key mechanism for continuous improvement; robust psychometric foundations enhance the validity of educational decisions.**

Keywords **- Educational assessment, Educational Quality, Laguna Region Assessment, Learning outcomes, Psychometric analysis.**

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID072

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

I. INTRODUCCIÓN

La evaluación educativa constituye uno de los principales mecanismos para analizar, comprender y fortalecer los procesos de enseñanza y aprendizaje en los sistemas escolares. En las últimas décadas, la evaluación ha evolucionado de modelos centrados exclusivamente en la medición del rendimiento académico hacia enfoques más integrales, orientados a la mejora continua, a la toma de decisiones pedagógicas y al fortalecimiento de la calidad educativa. Desde esta perspectiva, la evaluación no solo permite identificar niveles de desempeño, sino también reconocer áreas de oportunidad, necesidades de atención y factores asociados al aprendizaje de los estudiantes.

En el contexto internacional, organismos como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2019) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2021) han destacado la importancia de desarrollar sistemas de evaluación pertinentes, contextualizados y basados en evidencia, capaces de orientar las políticas educativas y las estrategias de intervención escolar. Diversos estudios recientes señalan que la evaluación educativa debe concebirse como una herramienta formativa que contribuya a mejorar la equidad, la inclusión y el logro académico, en particular en contextos regionales con alta diversidad social y educativa.

En México, la Secretaría de Educación Pública (2022) ha impulsado procesos de transformación curricular y pedagógica orientados al fortalecimiento del aprendizaje y al desarrollo integral de los estudiantes. El Plan de Estudio 2022 para la educación básica enfatiza la necesidad de promover procesos de evaluación formativa que retroalimenten el trabajo docente y favorezcan la construcción de aprendizajes significativos. En este sentido, la evaluación adquiere un papel estratégico en la Nueva Escuela Mexicana, al priorizar el análisis contextualizado de los resultados educativos y la atención a las necesidades reales de las comunidades escolares.

A nivel estatal, el Programa Educativo Durango 2023–2028 reconoce la importancia de implementar acciones orientadas a mejorar la calidad educativa mediante el uso de información diagnóstica y el fortalecimiento de estrategias pedagógicas basadas en evidencia. Particularmente en la Región Laguna, integrada por municipios como Gómez Palacio y Lerdo, existen características sociales, económicas y culturales que demandan procesos de evaluación contextualizados, capaces de responder a las necesidades específicas de las escuelas y de los estudiantes de educación básica.

En este contexto surge el Proyecto Evaluación Región Laguna 2025–2026, cuyo propósito es generar información diagnóstica sobre el desempeño académico de estudiantes de primaria y secundaria mediante instrumentos de evaluación alineados con el currículo vigente. El proyecto busca identificar fortalezas y áreas de oportunidad en competencias relacionadas con la comprensión lectora, la producción escrita y el pensamiento matemático, así como aportar evidencia que contribuya a la toma de decisiones pedagógicas y de gestión educativa.

Desde el enfoque metodológico, el proyecto incorpora procedimientos de validación y de análisis psicométrico y estadístico para asegurar la confiabilidad y la pertinencia de los resultados. El uso de modelos de análisis, como el coeficiente alfa de Cronbach y el modelo de Rasch, permite mejorar la precisión de las mediciones y ofrecer una interpretación más robusta del desempeño académico de los estudiantes.

Asimismo, el estudio se fundamenta en la necesidad de contar con procesos de evaluación regionales que complementen la información proporcionada por sistemas nacionales e internacionales, permitiendo a las instituciones educativas disponer de datos más cercanos a su realidad y contexto. La generación de evidencia local constituye una herramienta clave para diseñar estrategias de intervención focalizadas y para fortalecer el trabajo docente desde una perspectiva de mejora continua.

El proyecto tiene por objetivo analizar la importancia de la evaluación educativa en la Región Laguna de Durango, a partir de la implementación del Proyecto Evaluación Región Laguna 2025–2026, incorporando evidencia técnica, análisis estadístico y fundamentos psicométricos que permitan valorar la utilidad de la evaluación como herramienta para la mejora educativa y la toma de decisiones basada en evidencia científica.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Diseño metodológico

El estudio tiene un enfoque cuantitativo con alcance descriptivo-analítico y un componente psicométrico orientado a evaluar la calidad técnica del Instrumento de Evaluación Regional aplicado en escuelas de educación básica de la Región Laguna, Durango. El diseño metodológico se estructuró con el propósito de generar información diagnóstica contextualizada que permitiera identificar fortalezas y áreas de oportunidad en el desempeño académico de estudiantes de 2° a 6° de primaria y de 1° a 3° de secundaria, así como aportar evidencia útil para la toma de decisiones pedagógicas y de gestión educativa.

La investigación se realizó durante el ciclo escolar 2025–2026 mediante la aplicación piloto del instrumento en instituciones educativas ubicadas en municipios como Gómez Palacio y Lerdo, caracterizados por una importante diversidad social, económica y cultural. La muestra estuvo conformada por un total de 1,373 estudiantes, distribuidos entre educación primaria y secundaria, seleccionados mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, considerando criterios de accesibilidad institucional, disposición a participar y la representatividad de diferentes contextos escolares.

El Instrumento de Evaluación Regional fue diseñado con base en los contenidos y aprendizajes establecidos en el Plan de Estudio 2022 para la educación básica, e integra reactivos orientados a evaluar competencias relacionadas con la comprensión lectora, la producción escrita y el pensamiento

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID072

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

matemático. La estructura del instrumento contempló reactivos de opción múltiple organizados por nivel educativo y grado escolar, procurando una progresión cognitiva acorde con las características de desarrollo de los estudiantes.

Para garantizar la pertinencia y la calidad técnica del instrumento, la validación de contenidos se realizó mediante el juicio de expertos en evaluación educativa, en educación básica y en diseño curricular. Dicho procedimiento permitió revisar la congruencia, la claridad y la relevancia de los reactivos respecto de los aprendizajes esperados y de las competencias evaluadas.

Posteriormente, se realizó un análisis psicométrico orientado a determinar la confiabilidad y la estabilidad de las mediciones obtenidas. La consistencia interna del instrumento se evaluó mediante el coeficiente alfa de Cronbach y el índice KR-20, mientras que el ajuste de los reactivos se examinó mediante el modelo de Rasch, lo que permitió estimar los parámetros de dificultad y el comportamiento de los ítems en una escala logarítmica. Este enfoque favoreció una interpretación más precisa y objetiva de los resultados.

En cuanto al análisis estadístico, se emplearon técnicas descriptivas e inferenciales. Inicialmente se calcularon medias, desviaciones estándar y porcentajes para identificar tendencias generales en el desempeño académico. Asimismo, se realizaron comparaciones entre grados y niveles educativos con el propósito de identificar diferencias significativas en los resultados obtenidos. De manera complementaria, se analizaron correlaciones entre variables académicas para explorar posibles relaciones entre la comprensión lectora y el desempeño matemático.

Finalmente, el estudio integró criterios éticos relacionados con el uso responsable de la información y la confidencialidad, garantizando que los resultados se utilizaran exclusivamente con fines académicos y de mejora educativa. Desde esta perspectiva, el diseño metodológico permitió integrar procedimientos técnicos, estadísticos y psicométricos orientados a fortalecer la validez y la utilidad de la evaluación educativa regional.

2.2 Análisis estadístico

El análisis estadístico del presente estudio se desarrolló con el propósito de identificar tendencias, diferencias y relaciones significativas en el desempeño académico de los estudiantes evaluados, así como determinar la calidad técnica y la confiabilidad del Instrumento de Evaluación Regional aplicado en la Región Laguna, Durango. Para ello, se implementó un proceso sistemático de organización, depuración y análisis de datos utilizando procedimientos estadísticos descriptivos, inferenciales y psicométricos que permitieran fortalecer la interpretación de los resultados.

En una primera etapa, se depuró y codificó la base de datos derivada de la aplicación piloto del instrumento. Posteriormente, los resultados fueron organizados por nivel educativo, grado escolar y área de evaluación, considerando competencias relacionadas con la comprensión lectora, la producción escrita y el pensamiento matemático. Este procedimiento permitió generar una estructura de análisis más precisa y contextualizada.

Como parte del análisis descriptivo, se calcularon medidas de tendencia central y de dispersión, incluyendo medias, medianas, desviaciones estándar y porcentajes de desempeño. Estas medidas permitieron identificar el comportamiento general de los resultados, así como detectar áreas críticas de aprendizaje y variaciones entre niveles educativos. Asimismo, se construyeron distribuciones de frecuencia y representaciones gráficas para facilitar la visualización de tendencias y patrones en el desempeño académico.

La ecuación (1) se utiliza para calcular el coeficiente alfa de Cronbach, con el propósito de evaluar la consistencia interna del instrumento; este coeficiente y el índice KR-20 se emplean comúnmente en estudios educativos y psicométricos para estimar la confiabilidad de pruebas compuestas por reactivos dicotómicos y de escalas de medición.

$$\alpha = \frac{k}{(k-1)} * (1 - \frac{\sum \sigma_i^2}{\sigma_t^2}) \quad (1)$$

Donde k representa el número de ítems, σ_i^2 la varianza de cada ítem y σ_t^2 la varianza total de la prueba.

Asimismo, se utilizó el Modelo de Rasch para evaluar el ajuste de los reactivos y la precisión de la medición, considerando los índices INFIT y OUTFIT. Este modelo permitió estimar la dificultad de los ítems y la habilidad de los estudiantes en una misma escala logit, lo que favoreció una interpretación más robusta de los resultados.

Adicionalmente, se aplicaron análisis de correlación de Pearson para identificar relaciones entre variables de desempeño académico y análisis de varianza (ANOVA) para comparar resultados entre grados escolares.

2.3 Ajuste de ítems (Modelo de Rasch)

Con el propósito de fortalecer la validez interna y la precisión de las mediciones obtenidas mediante el Instrumento de Evaluación Regional, se implementó un análisis psicométrico basado en el Modelo de Rasch. Este modelo forma parte de la Teoría de Respuesta al Ítem (TRI) y permite analizar simultáneamente la dificultad de los reactivos y la habilidad de los estudiantes en una misma escala de medición, denominada escala logit. Su utilización resulta especialmente pertinente en estudios educativos, pues favorece interpretaciones más objetivas, comparables y técnicamente robustas del desempeño académico.

A diferencia de los enfoques clásicos de evaluación, el Modelo de Rasch permite estimar la probabilidad de que un estudiante

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID072

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

responda correctamente a un reactivo, considerando la interacción entre el nivel de habilidad del estudiante y la dificultad del ítem. Desde esta perspectiva, el modelo busca verificar que los reactivos funcionen de manera coherente y estable en el instrumento, asegurando que cada uno contribuya adecuadamente a la medición de la competencia evaluada.

Para el análisis de ajuste se calcularon los índices INFIT (Information-Weighted Fit) y OUTFIT (Outlier-Sensitive Fit), considerados indicadores fundamentales para evaluar el comportamiento de los reactivos. El índice INFIT se utiliza para detectar inconsistencias en reactivos cercanos al nivel de habilidad del estudiante, mientras que el OUTFIT identifica respuestas atípicas o inesperadas en reactivos con niveles de dificultad alejados de la habilidad estimada.

Los valores esperados para ambos índices se encuentran cercanos a 1.0; se consideran generalmente aceptables rangos entre 0.8 y 1.2. Valores superiores a este rango pueden indicar ruido o comportamiento impredecible del reactivo, mientras que valores inferiores sugieren sobreajuste o redundancia en la medición. A partir de este criterio, se analizó de manera individual el comportamiento de cada reactivo del instrumento.

Los resultados evidenciaron que la mayoría de los reactivos presentaron niveles adecuados de ajuste al modelo, lo que indica coherencia interna y estabilidad en la medición de las competencias evaluadas. No obstante, algunos ítems mostraron ligeras desviaciones en los índices INFIT y OUTFIT, en particular en reactivos relacionados con la interpretación de información compleja y la resolución de problemas matemáticos. Estas variaciones sugieren la necesidad de ajustar la redacción, la claridad o el nivel de dificultad de determinados reactivos para futuras aplicaciones del instrumento.

Asimismo, el análisis permitió identificar diferencias en la distribución de la dificultad entre las áreas académicas. En matemáticas se observaron reactivos con niveles de dificultad más elevados que en comprensión lectora y en producción escrita, lo cual coincide con las tendencias generales de desempeño identificadas en el análisis descriptivo e inferencial.

Como parte del procedimiento psicométrico, también se generó un mapa de Wright, una representación gráfica que permite visualizar simultáneamente la distribución de habilidades de los estudiantes y la dificultad de los reactivos en una misma escala logit. Este análisis permitió identificar que la mayoría de los estudiantes se concentró en niveles intermedios de habilidad, mientras que ciertos reactivos se ubicaron en rangos de dificultad elevados, lo que generó mayores desafíos para los participantes.

La utilización del Modelo de Rasch permitió fortalecer significativamente la calidad técnica del instrumento, aportando evidencia sobre la funcionalidad de los reactivos y favoreciendo una interpretación más precisa de los resultados académicos. Desde esta perspectiva, el análisis de ajuste de ítems representa un elemento clave para garantizar procesos de evaluación más válidos, confiables y contextualizados, orientados a la mejora educativa y a la toma de decisiones basada en evidencia.

2.4 Análisis inferencial

El análisis inferencial del presente estudio tuvo como finalidad identificar diferencias significativas en el desempeño académico de los estudiantes evaluados, así como explorar relaciones entre variables asociadas a las competencias de comprensión lectora, producción escrita y pensamiento matemático. Este procedimiento permitió superar el análisis descriptivo y generar interpretaciones estadísticas orientadas a comprender los patrones de comportamiento académico en la muestra estudiada.

Como parte del proceso analítico, se verificaron inicialmente los supuestos estadísticos de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de los datos, con el propósito de determinar la pertinencia de las pruebas inferenciales aplicadas. Posteriormente, se realizaron análisis comparativos entre grados y niveles educativos mediante pruebas de varianza (ANOVA), que permitieron identificar diferencias significativas en los resultados de los estudiantes.

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas entre los grados escolares en las áreas evaluadas, en particular en matemáticas y en comprensión lectora. Los resultados evidenciaron una tendencia a la disminución progresiva del desempeño a medida que avanzaba el nivel educativo, con mayores dificultades en los grados superiores de primaria y secundaria. Estos hallazgos sugieren la presencia de rezagos acumulativos en habilidades académicas fundamentales, especialmente en competencias relacionadas con el razonamiento lógico, la resolución de problemas y el análisis de información.

Asimismo, se realizaron comparaciones de medias entre áreas académicas para identificar diferencias en el desempeño estudiantil. Los resultados indicaron que Matemáticas presentó los niveles de rendimiento más bajos en comparación con la comprensión lectora y la producción escrita, lo cual coincide con las tendencias reportadas en estudios nacionales e internacionales sobre el aprendizaje en la educación básica.

Como complemento del análisis comparativo, se realizaron análisis correlacionales mediante el coeficiente de correlación de Pearson para explorar las relaciones entre variables académicas. Los resultados mostraron asociaciones positivas y estadísticamente significativas entre la comprensión lectora y el desempeño matemático, lo que indica que los estudiantes con mejores habilidades de comprensión también tendían a obtener mejores resultados en la resolución de problemas matemáticos.

Adicionalmente, se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple para identificar variables predictoras del desempeño académico. Los resultados evidenciaron que la comprensión

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID072

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

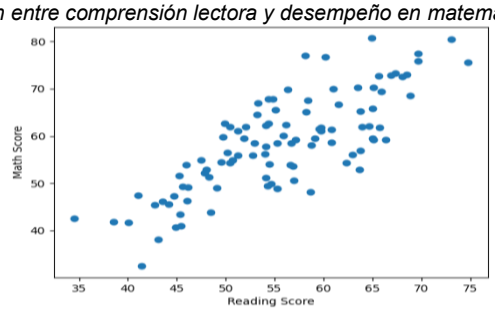
lectora fue uno de los principales predictores del rendimiento en matemáticas, lo que sugiere una relación estructural entre ambas competencias. Este hallazgo respalda la importancia de fortalecer las habilidades lectoras como parte de las estrategias de mejora académica integral.

En términos generales, el análisis inferencial permitió identificar patrones relevantes en el desempeño estudiantil y aportó evidencia estadística que sustenta las interpretaciones del estudio. Los resultados obtenidos no solo permitieron identificar áreas críticas de aprendizaje, sino también generar información útil para el diseño de estrategias pedagógicas focalizadas y para la toma de decisiones educativas basadas en evidencia.

Finalmente, la integración de procedimientos inferenciales y psicométricos fortaleció la solidez metodológica del estudio, lo que favoreció una interpretación más precisa y contextualizada de los resultados del Proyecto Evaluación Región Laguna 2025–2026.

En la Figura 1 se observa que la mayoría de los estudiantes se concentran en niveles intermedios de habilidad, mientras que algunos reactivos presentan niveles de dificultad elevados, lo cual podría explicar las áreas críticas identificadas.

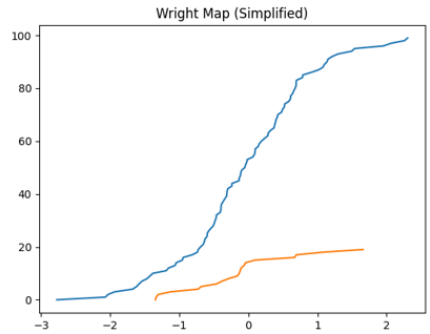
Figura 1.
Relación entre comprensión lectora y desempeño en matemáticas



2.5 Representación gráfica del modelo (Wright Map)

La Figura 2 presenta un ejemplo conceptual del mapa de Wright, en el que se representa la distribución de la habilidad de los estudiantes y de la dificultad de los ítems en una misma escala logit.

Figura 2
Mapa de Wright: distribución de habilidades e ítems



La Tabla 1 presenta los promedios generales obtenidos en los ocho grados de educación básica evaluados. Se excluyó el primer grado de primaria porque en esta etapa los estudiantes se encuentran en el proceso inicial de adquisición de las habilidades básicas de lectoescritura y de pensamiento matemático. Los resultados muestran que los promedios más altos corresponden al segundo grado de secundaria y al segundo grado de primaria, con valores de 64.55 y 60.95 puntos, respectivamente. En contraste, el promedio más bajo se registró en sexto grado de primaria, con 44.69 puntos, lo que evidencia diferencias en el desempeño académico entre los distintos niveles educativos evaluados.

Tabla 1
Promedio General por Grado

Nivel	*Grado*	*Promedio*
Primaria	2°	60.95
Primaria	3°	50.86
Primaria	4°	50.82
Primaria	5°	49.07
Primaria	6°	44.69
Secundaria	1°	55.62
Secundaria	2°	64.55
Secundaria	3°	60.17

Con el análisis descriptivo, se identificó que la asignatura de Matemáticas presenta el nivel de desempeño más bajo (M = 58; DE = 10), seguida de comprensión lectora (M = 62; DE = 8) y producción escrita (M = 60; DE = 9), como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2.
Promedios de desempeño académico por área

Área	**Media**	**Desviación estándar**	**Nivel**
Matemáticas	58	10	Bajo
Lectura	62	8	Medio
Escritura	60	9	Medio

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del estudio evidencian patrones relevantes en el desempeño académico de los estudiantes de educación básica en la Región Laguna de Durango; el nivel de desempeño en matemáticas refleja una tendencia consistente con reportes nacionales e internacionales, en los que las habilidades matemáticas constituyen uno de los principales retos en los sistemas educativos.

El análisis inferencial mediante ANOVA reveló diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento académico entre niveles educativos ($F = 4.32$, $p < 0.05$), lo que indica un descenso progresivo del desempeño a medida que aumenta el grado escolar. Este hallazgo sugiere la existencia de brechas acumulativas en el aprendizaje, particularmente en contenidos que requieren habilidades de pensamiento lógico-matemático y de comprensión conceptual.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID072

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

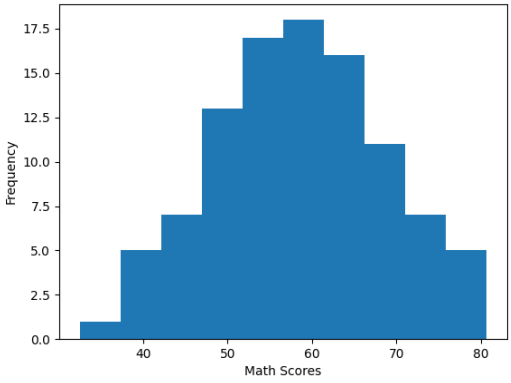
Por otra parte, el análisis de correlación de Pearson mostró una relación positiva y significativa entre la comprensión lectora y el desempeño en matemáticas ($r = 0.64$, $p < 0.01$), lo cual se confirmó mediante un modelo de regresión lineal, en el que la comprensión lectora se identificó como un predictor significativo del desempeño en matemáticas ($\beta = 0.58$, $p < 0.01$). En la Figura 2, incluida en la sección de análisis inferencial, se observa esta relación, lo que evidencia que los estudiantes con mayor comprensión lectora presentan un mayor rendimiento académico en matemáticas. Este resultado coincide con estudios previos que destacan la interdependencia entre las habilidades lingüísticas y matemáticas en el proceso de aprendizaje.

Desde el enfoque psicométrico, el análisis mediante el Modelo de Rasch permitió evaluar la calidad del instrumento de medición. Los índices INFIT y OUTFIT se ubicaron mayoritariamente en el rango aceptable (0.8–1.2), lo que indica un ajuste adecuado de los reactivos al modelo. No obstante, algunos ítems presentaron ligeras desviaciones, lo que sugiere la necesidad de una revisión y un ajuste en futuras aplicaciones del instrumento.

Asimismo, la representación gráfica mediante el mapa de Wright permitió identificar la distribución de la habilidad de los estudiantes en función de la dificultad de los ítems. Se observó que la mayoría de los estudiantes se concentran en niveles intermedios de habilidad, mientras que ciertos reactivos presentan niveles de dificultad elevados, lo cual podría explicar las áreas críticas detectadas en los resultados.

En términos de distribución, la Figura 3 muestra la dispersión de los puntajes en Matemáticas y evidencia una concentración en los niveles bajos y medios. Estos resultados confirman la pertinencia del instrumento aplicado y permiten inferir la necesidad de implementar estrategias de intervención focalizadas.

Figura 3. *Distribución de puntajes en el área de Matemáticas*



En conjunto, los hallazgos del estudio coinciden con las tendencias reportadas por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (2019) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2021), que destacan la importancia de fortalecer las competencias básicas, como la lectura y el pensamiento matemático, para mejorar la calidad educativa. En este sentido, los resultados aportan evidencia empírica relevante que permite orientar acciones de mejora educativa contextualizadas en la Región Laguna

IV. CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio confirman que la evaluación educativa, sustentada en enfoques psicométricos sólidos y en el análisis estadístico de datos, constituye una herramienta estratégica para la mejora de los sistemas escolares. La implementación del Instrumento de Evaluación Regional en la Región Laguna permitió generar evidencia empírica relevante sobre el desempeño académico de los estudiantes, identificando áreas críticas, en particular en matemáticas, así como debilidades en la comprensión lectora y en la producción escrita.

El análisis inferencial evidenció diferencias significativas entre niveles educativos, lo que sugiere la existencia de brechas acumulativas en el aprendizaje que requieren atención oportuna. Asimismo, la relación significativa entre la comprensión lectora y el desempeño en matemáticas refuerza la necesidad de abordar el aprendizaje desde una perspectiva integral, reconociendo la interdependencia entre distintas competencias.

Desde el enfoque psicométrico, el uso del Modelo de Rasch permitió validar la calidad del instrumento, aportando precisión en la medición y confiabilidad a los resultados. Este aspecto fortalece la utilidad de la evaluación no solo como mecanismo diagnóstico, sino también como base para la toma de decisiones pedagógicas.

En términos prácticos, los hallazgos ofrecen insumos relevantes para el diseño de estrategias de intervención educativa focalizadas, orientadas a fortalecer las competencias básicas de los estudiantes. Asimismo, evidencian la necesidad de consolidar sistemas de evaluación contextualizados que respondan a las características específicas de cada región.

Los resultados ofrecen información valiosa para la práctica educativa y la definición de políticas, ya que permiten conocer con mayor claridad el estado actual de las habilidades lingüísticas y matemáticas en la educación básica. En el ámbito pedagógico, los datos permiten identificar tanto aciertos como aspectos que requieren atención, lo que facilita el diseño de intervenciones y apoyos académicos más focalizados. El uso de un enfoque psicométrico, por otra parte, aporta consistencia a las mediciones y a la interpretación de los desempeños observados.

En la gestión escolar, los resultados pueden orientar los procesos de planeación y seguimiento, ofreciendo a directivos y docentes elementos concretos para establecer metas de mejora. Asimismo, la identificación de patrones de desempeño vinculados a factores contextuales sugiere la conveniencia de ajustar las estrategias pedagógicas a las características de los estudiantes y de sus entornos.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID072

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Desde la óptica de las políticas estatales, los hallazgos aportan criterios para asignar recursos y atender prioritariamente las regiones con mayores rezagos. Constituyen, además, una base para el diseño de programas orientados al fortalecimiento de competencias básicas y para la implementación de sistemas que permitan dar seguimiento a su impacto. Los resultados tienen el potencial de sentar las bases de una estrategia estatal que articule la formación docente, la actualización curricular, los materiales educativos y el acompañamiento pedagógico, con miras a mejorar de manera sostenida la calidad educativa en el sistema.

Una limitación que debe reconocerse en este proyecto es que la muestra no se seleccionó mediante procedimientos probabilísticos, por lo que los resultados no pueden generalizarse a la población estudiantil de educación básica. Aunque los datos recabados ofrecen elementos de juicio valiosos sobre las carencias en habilidades lingüísticas y matemáticas, conviene no perder de vista que los participantes fueron elegidos con base en su accesibilidad y disponibilidad, y no necesariamente por criterios de representatividad estadística.

Además, el estudio se circunscribe a una región con características particulares en los ámbitos social, cultural y educativo. Es probable que esas condiciones no sean comparables a las de otras zonas del estado, por lo que las conclusiones aquí vertidas deben leerse a la luz de ese contexto específico.

Los hallazgos coinciden con lo reportado en otras investigaciones realizadas en México, donde la evaluación psicométrica ha resultado útil para identificar fortalezas y debilidades en habilidades lingüísticas y matemáticas, así como para fundamentar decisiones pedagógicas. La evidencia sugiere que ampliar este tipo de evaluaciones a nivel estatal podría aportar información clave para el diseño de programas de fortalecimiento académico y para reducir las brechas de aprendizaje entre regiones y grupos estudiantiles.
Ordaz Villegas y Acle Tomasini (2021) evaluaron el desempeño matemático de 444 estudiantes de primaria y encontraron avances y rezagos en distintos componentes del aprendizaje, lo que evidencia que la evaluación objetiva puede orientar estrategias preventivas e intervinientes. Medina Gual, Martínez Bordón y Patiño Domínguez (2023), con base en más de 164 mil solicitudes de PLANEA, documentaron una caída importante en el rendimiento posterior a la pandemia y una clara relación con las condiciones socioeconómicas, lo que ofrece elementos útiles para el diseño de políticas educativas.

Las evaluaciones diagnósticas de MEJOREDU, implementadas desde 2021, se han consolidado como un referente nacional al ofrecer información sólida para apoyar decisiones pedagógicas y acciones de mejora con un enfoque formativo. Finalmente, Tapia Bernabé y González Mejía (2018), aunque en el nivel de media superior, aportan referentes metodológicos al analizar pruebas diagnósticas con indicadores basados en la Teoría Clásica de los Test, destacando la importancia de instrumentos técnicamente robustos para diagnósticos precisos y decisiones fundamentadas.

Finalmente, se sugiere, como línea de continuidad, el desarrollo de estudios longitudinales que permitan analizar la evolución del aprendizaje a lo largo del tiempo, así como la integración de modelos estadísticos complejos que profundicen en la comprensión de los factores asociados al rendimiento académico. De esta manera, la evaluación educativa se consolida como un componente clave para fortalecer la calidad y la equidad en la educación.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su más profundo agradecimiento a la Subsecretaría de Educación Región Laguna por el respaldo institucional brindado para el desarrollo del Proyecto Evaluación Región Laguna 2025–2026, así como por impulsar iniciativas orientadas al fortalecimiento de la calidad educativa y a la toma de decisiones basadas en evidencia en las escuelas de educación básica de la región.
Se reconoce la valiosa colaboración de las instituciones educativas, directivos y docentes participantes en el proyecto, quienes hicieron posible la aplicación del Instrumento de Evaluación Regional mediante su disposición, organización y acompañamiento a lo largo de las diferentes etapas del proceso. Su participación fue un elemento fundamental para obtener información diagnóstica contextualizada y para fortalecer los procesos de evaluación educativa regional.

Asimismo, se agradece a las y los estudiantes de educación primaria y secundaria que participaron en el pilotaje, así como a las madres, los padres y los cuidadores que brindaron apoyo durante la implementación del proyecto. Su colaboración permitió obtener evidencia relevante para el análisis del desempeño académico e identificar las áreas de oportunidad en el aprendizaje.

Los autores también reconocen el valioso apoyo de especialistas en evaluación educativa, análisis estadístico y psicometría que contribuyeron a la revisión técnica, la validación de contenido y el análisis metodológico del instrumento. Sus aportaciones fortalecieron la confiabilidad, la pertinencia y el rigor científico del estudio.

Finalmente, se agradece a las instituciones académicas y a los equipos de investigación que promovieron espacios de diálogo y reflexión sobre la evaluación educativa, contribuyendo al desarrollo de propuestas orientadas a mejorar la calidad educativa en la Región Laguna y en el estado de Durango.

VI. REFERENCIAS

Black, P., & Wiliam, D. (1998). Assessment and classroom learning. *Assessment in Education: Principles, Policy & Practice, 5*(1), 7–74. https://doi.org/10.1080/0969595980050102

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Bond, T. G., & Fox, C. M. (2015). *Applying the Rasch model: Fundamental measurement in the human sciences* (3rd ed.). Routledge.

Brown, G. T. L. (2019). Is assessment for learning really assessment? *Frontline Learning Research, 7*(3), 1–6. https://doi.org/10.14786/flr.v7i3.438

Centro de Investigación e Innovación para el Desarrollo Educativo. (2023). *Informe de resultados educativos en la Región Laguna. CIIDE*.

Comisión Nacional para la Mejora Continua de la Educación (MEJOREDU). (2021). *Evaluaciones diagnósticas para la mejora de los aprendizajes de los estudiantes de educación básica.* Gobierno de México.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill.

Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación. (2019). *La educación obligatoria en México: Informe 2019*. INEE.

Medina Gual, L., Martínez Bordón, A., & Patiño Domínguez, H. (2023). *Los aprendizajes esperados en Lenguaje y comunicación y en Matemáticas en la educación básica y media superior: Un análisis comparativo antes y después de la pandemia por COVID-19 a partir de las pruebas PLANEA*. En *Memorias del XVII Congreso Nacional de Investigación Educativa*. Consejo Mexicano de Investigación Educativa. https://www.comie.org.mx/congreso/memoriaelectronica/v17/doc/2197.pdf

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (2019). *PISA 2018 results (Volume I): What students know and can do.* OCDE. https://doi.org/10.1787/5f07c754-en

Ordaz Villegas, G., & Acle Tomasini, G. (2021). Desempeño matemático: Evaluación por rúbricas en los primeros grados de educación básica. *Perfiles Educativos, 43*(173), 76–95. https://doi.org/10.22201/iisue.24486167e.2021.173.59772

Perrenoud, P. (2008). *La evaluación de los alumnos: de la producción de la excelencia a la regulación de los aprendizajes.* Colofón.

Secretaría de Educación Pública. (2022). *Plan de estudio para la educación preescolar, primaria y secundaria*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/754160/Plan_de_estudio_para_la_educacio_n_preescolar_primaria_y_secundaria.pdf

Tapia Bernabé, I. R., & González Mejía, L. E. (2020). Análisis psicométrico de los exámenes de Matemáticas y de Lenguaje y Comunicación en el CONALEP del Estado de México. *Ethos Educativo, 55*, 107–129. https://www.imced.edu.mx/Ethos/Archivo/55/Ethos55.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2021). *Reimaginar juntos nuestros futuros: Un nuevo contrato social para la educación.* UNESCO. https://unesdoc.unesco.org

Wilson, M. (2005). *Constructing measures: An item response modeling approach*. Routledge.

Wright, B. D., & Stone, M. H. (2004). *Making measures*. The Phaneron Press.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización	**Fernando Ulises Adame de León; Gerardo de Jesús Garza Rosales**
2	Curación de datos	**César Miranda Guardado; Elda Moreno Núñez**
3	Análisis formal	**Gerardo de Jesús Garza Rosales**
4	Obtención de fondos	**Fernando Ulises Adame de León**
5	Investigación	**César Miranda Guardado; Olivia García Morales**
6	Metodología	**Gerardo de Jesús Garza Rosales; Fernando Ulises Adame de León**
7	Administración del proyecto	**Fernando Ulises Adame de León**
8	Recursos	**Subsecretaría de Educación Región Laguna**
9	Software	**César Miranda Guardado**
10	Supervisión	**Fernando Ulises Adame de León**
11	Validación	**Gerardo de Jesús Garza Rosales**
12	Visualización	**Elda Moreno Núñez**
13	Redacción – borrador original	**Gerardo de Jesús Garza Rosales**
14	Redacción – revisión y edición	**Fernando Ulises Adame de León; Gerardo de Jesús Garza Rosales, Elda Moreno Núñez**

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID072

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Diseño e Implementación de un Protocolo de Preparación y Sensibilización Escolar para la Reincorporación integral de Alumnos en Duelo

Design and Implementation of a School-Based Preparation and Awareness Protocol for the Comprehensive Reintegration of Bereaved Students

Cabrales-Valenzuela, A.E.[1]; Moreno-Núñez, E.[2]; Garza-Rosales, G.J.[3]; Vargas-Lerma, J.F.[4]

Datos de Adscripción:

[1] Cabrales Valenzuela, Adán Emilio
Instituto de Estudios Superiores de Educación Normal "Gral. Lázaro Cárdenas del Río", Ciudad Lerdo, Durango. México
direccion2026@iesenlerdo.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5374-7230

[2] ✉ Moreno Núñez, Elda
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
elda.mn@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5912-082X

[3] Garza Rosales, Gerardo de Jesús
Instituto de Estudios Superiores de Educación Normal "Gral. Lázaro Cárdenas del Río", Ciudad Lerdo, Durango. México
gjgarzarosales@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2641-6402

[4] Vargas Lerma, Jorge Fernando
Instituto de Estudios Superiores de Educación Normal "Gral. Lázaro Cárdenas del Río", Ciudad Lerdo, Durango. México
jorgefernandovl@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2232-1289

Resumen **- El artículo documenta el diseño e implementación de un Protocolo de Preparación y Sensibilización Escolar, cuyo propósito es facilitar la reincorporación integral de alumnos en duelo, promoviendo su bienestar emocional y su adaptación al entorno escolar. Se utiliza un enfoque mixto, cualitativo con orientación a la investigación-acción para el diseño de la intervención y un análisis estadístico cuantitativo para evaluar su implementación. El muestreo es intencional o por conveniencia; la colaboración es voluntaria y, en todo momento, se garantiza el bienestar emocional y el respeto a la privacidad de los participantes. El proyecto contó con la participación de los miembros de la comunidad educativa de las escuelas primarias estatales pertenecientes a la Zona Escolar 02 de Gómez Palacio, Durango, quienes son los protagonistas del proceso de análisis, diseño e implementación del protocolo de preparación y sensibilización escolar: directores, docentes, alumnos y padres de familia. Se buscó integrar diversas voces y perspectivas para que el protocolo reflejara experiencias reales. Con base en el análisis sistemático de los datos estadísticos, resultado de la aplicación de encuestas al personal docente y directivo, se define la necesidad imperante de un protocolo de reintegración escolar en las escuelas que oriente la incorporación de los alumnos que recientemente han experimentado el fallecimiento de familiares que representaban figuras importantes para ellos. El resultado es la implementación de la intervención diseñada. Se presentan algunas actividades del protocolo, casos prácticos, guías de reflexión y formatos para el diseño de planes de acompañamiento.**

Palabras Clave**: Apoyo socioemocional, Bienestar emocional, Duelo infantil, Investigación-acción, Protocolos escolares, Reincorporación escolar.**

Abstract **- This article documents the design and implementation of a School-Based Preparation and Awareness Protocol to facilitate the comprehensive reintegration of bereaved students by promoting their emotional well-being and adaptation to the school environment. The study used a mixed-methods approach: a qualitative, action-research-oriented approach to design the intervention and quantitative statistical analysis to evaluate its implementation. Sampling was intentional or convenience-based; participation was voluntary, and the study protected participants' emotional well-being and privacy at all stages. The project involved members of the educational community from state primary schools in School Zone 02 of Gómez Palacio, Durango, who served as key agents in analyzing, designing, and implementing the school preparation and awareness protocol. Participants included school principals, teachers, students, and parents to integrate multiple perspectives and ensure the protocol reflected real-life experiences. Based on the systematic analysis of statistical data obtained from surveys administered to teaching staff and school administrators, an urgent need was identified for a school reintegration protocol to guide the return of students who have recently experienced the death of family members who represented significant figures in their lives. The study's outcome is the implementation of the designed intervention, including selected protocol activities, practical cases, reflection guides, and templates for developing individualized support plans.**

Keywords **- Child grief, educational action research, emotional well-being, School-based protocols, School reentry, Socio-emotional support.**

I. INTRODUCCIÓN

El duelo infantil es una experiencia que puede afectar significativamente el desarrollo emocional, social y académico de

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

niñas, niños y adolescentes. La pérdida de una figura significativa puede generar dificultades en la adaptación escolar, el aprendizaje y la convivencia, por lo que las instituciones educativas desempeñan un papel fundamental al ofrecer entornos seguros que favorezcan el bienestar y la continuidad educativa.

Desde la perspectiva psicológica, Worden (2024) sostiene que el duelo implica un proceso de adaptación en el que la persona debe aceptar la pérdida, elaborar las emociones y reorganizar su vida. De manera complementaria, Bowlby (1982), mediante la teoría del apego, explica que la pérdida de una figura significativa puede alterar la sensación de seguridad en niñas y niños, lo que hace indispensable el acompañamiento de adultos que brinden estabilidad y apoyo durante este proceso.

En el ámbito educativo, la ausencia de protocolos específicos hace que la atención a los estudiantes en duelo dependa, en gran medida, de la experiencia de los docentes y directivos. Esta situación limita la posibilidad de ofrecer respuestas institucionales coordinadas que favorezcan una reincorporación escolar oportuna y un acompañamiento socioemocional integral. En este sentido, el Plan de Estudio para la Educación Preescolar, Primaria y Secundaria (Secretaría de Educación Pública, 2022) reconoce el bienestar socioemocional, la inclusión y la corresponsabilidad entre la escuela y la familia como principios fundamentales de la Nueva Escuela Mexicana.

Ante esta necesidad, la presente investigación desarrolla el Protocolo de Preparación y Sensibilización Escolar para la Reincorporación Integral de Alumnos en Duelo, concebido como una propuesta orientada a fortalecer la actuación de las instituciones de educación básica mediante acciones de prevención, acompañamiento y coordinación entre docentes, directivos y familias. El artículo presenta los fundamentos teóricos y el proceso metodológico que sustentan su diseño, con el propósito de contribuir al fortalecimiento de la atención socioemocional y la construcción de entornos escolares más inclusivos y humanistas.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

La presente sección describe el proceso metodológico seguido para el diseño del Protocolo de Preparación y Sensibilización Escolar para la Reincorporación Integral de Alumnos en Duelo. Se expone el enfoque de investigación, el contexto en el que se desarrolló el estudio, las características de los participantes, las técnicas e instrumentos empleados para la obtención de la información, así como el procedimiento seguido para el diseño y la validación de la propuesta. Finalmente, se describe la estrategia empleada para el análisis de la información, lo que garantiza la coherencia metodológica entre el objetivo del estudio y los resultados obtenidos.

2.1 Diseño metodológico

La investigación sigue un método mixto con predominio cualitativo, sustentado en el paradigma interpretativo, con el propósito de comprender las necesidades y experiencias de la comunidad educativa respecto de la atención a estudiantes en proceso de duelo. El estudio se orientó desde la investigación-acción, al integrar un proceso de diagnóstico, reflexión y diseño de una propuesta de intervención para fortalecer la respuesta institucional de las escuelas de educación básica.

Este diseño metodológico permitió analizar el fenómeno desde las perspectivas de docentes, directivos y familias, y recuperar información contextual para la elaboración del Protocolo de Preparación y Sensibilización Escolar para la Reincorporación Integral de Alumnos en Duelo, como una estrategia de acompañamiento escolar fundamentada en las necesidades identificadas durante la investigación.

2.2 Contexto y participantes

La investigación se desarrolló en instituciones de educación básica pertenecientes a la Zona Escolar 02 del Sector Educativo 03 de Educación Primaria Estatal, ubicada en el municipio de Gómez Palacio, Durango. Este contexto educativo se caracteriza por atender a estudiantes provenientes de entornos sociales y familiares diversos, en los que confluyen distintas realidades económicas, culturales y emocionales que inciden directamente en los procesos de aprendizaje, convivencia y desarrollo integral del alumnado.

La selección del escenario de estudio se basó en criterios de pertinencia y accesibilidad, al identificarse la necesidad de fortalecer las estrategias institucionales para atender situaciones de duelo infantil en las escuelas. Durante el diagnóstico inicial se observó que, aunque los docentes y directivos enfrentaban con relativa frecuencia situaciones de pérdida significativa de estudiantes, no existían lineamientos institucionales específicos que orientaran la actuación de la comunidad educativa durante el proceso de reincorporación escolar.

Los participantes fueron seleccionados mediante un muestreo intencional, propio de la investigación cualitativa, que privilegió la participación de actores que, por su experiencia y función en la comunidad educativa, pudieran aportar información relevante para comprender el fenómeno estudiado. Este tipo de selección permitió obtener diversas perspectivas sobre las necesidades de acompañamiento emocional y las condiciones institucionales que favorezcan una atención adecuada a los estudiantes en duelo.

La población participante estuvo integrada por directivos escolares, docentes frente a grupo, personal de apoyo educativo, madres y padres de familia, así como especialistas en la atención socioemocional del alumnado. La diversidad de participantes favoreció la recuperación de experiencias provenientes de distintos ámbitos de responsabilidad, enriqueciendo el proceso de análisis y permitiendo identificar coincidencias y necesidades comunes en el contexto escolar.

Los docentes aportaron información sobre las dificultades que enfrentan al atender a estudiantes que atraviesan procesos de duelo en el aula, así como sobre las estrategias que han implementado de manera empírica para brindar acompañamiento emocional. Por su parte, los directivos contribuyeron a identificar las necesidades institucionales vinculadas a la organización escolar, a la toma de decisiones y a la coordinación entre escuela y familia en este tipo de situaciones.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID082

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La participación de madres y padres de familia permitió conocer las expectativas y experiencias relacionadas con el apoyo que esperan recibir de las instituciones educativas cuando sus hijos atraviesan un proceso de pérdida significativa. De igual manera, la incorporación de especialistas en el ámbito socioemocional aportó elementos técnicos para fortalecer el diseño del protocolo y asegurar que las acciones propuestas respondieran a principios de intervención pertinentes al contexto educativo.
La diversidad de perfiles considerados durante la investigación permitió realizar un análisis integral del fenómeno y favoreció la construcción de una propuesta que incorpora las necesidades, experiencias y responsabilidades de los distintos actores que intervienen en la reincorporación escolar de estudiantes en duelo.

Esta visión multidisciplinaria fortaleció la pertinencia del protocolo, al reconocer que el acompañamiento emocional constituye una responsabilidad compartida entre la escuela, la familia y la comunidad, y permitió contextualizar el proceso de investigación y garantizar que las aportaciones obtenidas provinieran de actores directamente vinculados con la problemática analizada.
Los siguientes fueron los criterios de selección de los participantes:

Criterios de inclusión.

- ✓ Escuelas primarias pertenecientes a la Zona Escolar 02 de Gómez Palacio, Durango.
- ✓ Directores y docentes que acepten participar voluntariamente en el proyecto.
- ✓ Alumnos que hayan experimentado la pérdida de un familiar directo en un periodo no mayor de dos años.
- ✓ Padres o tutores que autoricen la participación del menor y estén dispuestos a colaborar en entrevistas o reuniones.
- ✓ Participantes dispuestos y abiertos a compartir sus experiencias de manera reflexiva y respetuosa.

Criterios de exclusión

- Escuelas que no autoricen la aplicación del protocolo.
- Docentes que no deseen participar en el proceso de observación.
- Alumnos que se rehúsen a participar o cuya familia considere que el proceso podría afectar su estabilidad emocional.
- Casos en los que el duelo esté relacionado con situaciones de violencia o de riesgo que requieran atención especializada externa.
- Participantes que se retiren voluntariamente durante el proceso o que no cumplan con los acuerdos éticos de confidencialidad y respeto.

2.3 Técnicas e instrumentos de recolección de información

El análisis se realizó con técnicas mixtas: la información obtenida mediante entrevistas, observaciones y revisión documental fue organizada y sistematizada para facilitar su interpretación. Se llevó a cabo un proceso de codificación y agrupación de la información en categorías temáticas relacionadas con el acompañamiento escolar, las necesidades institucionales, la participación de las familias y las estrategias de intervención. Este procedimiento permitió identificar patrones comunes, coincidencias y elementos relevantes para la elaboración del protocolo.
Posterior a la implementación del protocolo, se aplicó un instrumento cuantitativo de escala de Likert de 5 puntos y se realizó el análisis estadístico descriptivo y correlacional de las respuestas.
Como técnica cualitativa principal se empleó la entrevista semiestructurada, debido a su flexibilidad para profundizar en las experiencias y opiniones de los participantes sin perder de vista los objetivos de la investigación. La guía de entrevista fue organizada a partir de categorías previamente definidas relacionadas con el conocimiento del duelo infantil, las experiencias de acompañamiento escolar, las necesidades de formación docente y las acciones institucionales consideradas necesarias para favorecer una adecuada reincorporación del alumnado. Su contenido fue sometido a revisión por especialistas en educación y en atención socioemocional, con el propósito de fortalecer la claridad, pertinencia y congruencia de las preguntas respecto del objetivo del estudio.
La estructura semiestructurada permitió incorporar preguntas de seguimiento cuando las respuestas de los participantes aportaban información relevante para el estudio.
Asimismo, se desarrolló un análisis documental mediante la revisión de la literatura científica especializada, documentos normativos, protocolos nacionales e internacionales, lineamientos institucionales y antecedentes relacionados con el duelo infantil y el acompañamiento escolar. Esta revisión permitió identificar referentes teóricos y metodológicos que sustentaron la construcción del protocolo y favorecieron la integración de acciones acordes con las necesidades detectadas durante el trabajo de campo.
La información obtenida mediante las entrevistas se complementó con registros de observación y notas de campo elaborados durante el proceso de investigación. Estos registros permitieron documentar aspectos del contexto institucional, las expresiones de los participantes y las situaciones observadas en las diferentes fases del estudio, lo que posteriormente favoreció la interpretación integral de los hallazgos.
La utilización conjunta de entrevistas, observación y análisis documental permitió desarrollar un proceso de triangulación de fuentes de información, lo que fortaleció la credibilidad de los resultados y proporcionó una comprensión más amplia de la problemática abordada. Esta estrategia metodológica permitió contrastar las percepciones de los diferentes participantes con la evidencia documental y con los referentes teóricos disponibles, lo que contribuyó a la construcción de un protocolo fundamentado tanto en la experiencia práctica como en el conocimiento científico.

Para orientar el desarrollo del protocolo, con un enfoque de investigación-acción se plantean las siguientes preguntas guía:

1. ¿Cómo se vive actualmente el proceso de reincorporación de los alumnos en duelo en las escuelas primarias de la Zona Escolar 02 de Gómez Palacio, Durango?
2. ¿Qué actitudes, conocimientos o prácticas tienen los docentes y directivos ante la pérdida de un alumno?
3. ¿Qué elementos debería incluir un protocolo escolar para acompañar adecuadamente a los alumnos que han experimentado una pérdida familiar directa?

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID082

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

4. ¿De qué forma la implementación de un protocolo de preparación y sensibilización puede influir en la actitud del personal docente y en la adaptación emocional y académica de los alumnos en duelo?
5. ¿Qué resultados se observan en la convivencia escolar y en el ambiente emocional tras aplicar el protocolo?

Estas preguntas buscan comprender y transformar la realidad desde dentro, escuchando a los protagonistas del proceso escolar y dando voz a sus experiencias, percepciones y sentimientos. A partir de ellas, se formula la siguiente hipótesis central:

H_1.- La aplicación del Protocolo de Preparación y Sensibilización Escolar contribuye de manera significativa a la reincorporación integral de los alumnos en duelo, pues promueve una respuesta más empática, estructurada y emocionalmente saludable por parte de la comunidad educativa.

Esta hipótesis parte de la idea de que el acompañamiento escolar no debe limitarse a lo académico, sino que también debe atender el aspecto emocional del estudiante, especialmente cuando atraviesa momentos difíciles. Al contar con una guía institucional y personal capacitado, las escuelas pueden responder de manera más humana y efectiva ante el duelo. Además, se derivan algunas hipótesis complementarias que apoyan el desarrollo del proyecto:

H_2.- La sensibilización del personal docente sobre el duelo infantil mejora su capacidad para acompañar emocionalmente a los alumnos.

H_3.- La implementación de estrategias escolares basadas en la empatía y el respeto favorece la integración social y emocional de los estudiantes en duelo.

H_4.- La existencia de un protocolo institucional fortalece el sentido de comunidad en la escuela y reduce el impacto negativo del duelo sobre el rendimiento y la asistencia escolar.

Estas hipótesis servirán de guía para analizar los resultados de la intervención y valorar su efectividad en la práctica escolar. En conjunto, las preguntas y las hipótesis permiten mantener una ruta de investigación clara, centrada en la idea de que el acompañamiento en el duelo también es una forma de educar: una oportunidad para enseñar empatía, resiliencia y humanidad desde la escuela.

2.3 Procedimiento de la investigación

La investigación se desarrolló mediante un proceso organizado en cinco fases:

En la primera se realizó el diagnóstico, identificando las necesidades institucionales relacionadas con la atención a estudiantes en duelo.
Enseguida se realizó una revisión de la literatura científica y de documentos especializados, con el propósito de fundamentar teóricamente la propuesta de intervención.
La tercera fase consistió en la recolección de información cualitativa mediante entrevistas, observación y análisis documental, lo que permitió conocer las experiencias y percepciones de los participantes sobre el acompañamiento escolar durante el duelo.
Con base en esta información, se diseñó el Protocolo de Preparación y Sensibilización Escolar para la Reincorporación Integral de Alumnos en Duelo, que integra acciones dirigidas a docentes, directivos y familias.

La propuesta fue sometida a un proceso de revisión por especialistas, quienes emitieron observaciones para fortalecer la pertinencia, la claridad y la viabilidad del protocolo antes de su integración como propuesta de intervención educativa.

2.4 Variables, atributos y propiedades relacionadas con el objeto de estudio, así como sus indicadores y unidades de análisis a considerar en el diseño de la intervención.

Debido a la naturaleza cualitativa de la intervención educativa, las variables se abordan como dimensiones humanas y educativas que se manifiestan a través de actitudes, comportamientos, percepciones y experiencias en el entorno escolar.
En este sentido, las variables se entienden como los aspectos principales que orientan la observación, el análisis y la reflexión en torno al problema. Cada variable está compuesta por atributos o propiedades, es decir, las características observables que permiten identificar cómo se expresa cada una en la realidad de las escuelas. A partir de estas, se establecen indicadores cualitativos que servirán como señales para evaluar el impacto del protocolo en la comunidad educativa.

Variable 1: Reincorporación integral del alumno en duelo.
Atributos y propiedades:

- Nivel de adaptación emocional del alumno tras la pérdida.
- Capacidad del entorno escolar para brindar apoyo y contención.
- Reintegración del alumno en la dinámica académica y social del grupo.
- Sentimiento de pertenencia y de aceptación dentro de la comunidad escolar.

Indicadores cualitativos:

- Expresiones verbales y no verbales del alumno que reflejen comodidad o bienestar al regresar a la escuela.
- Observación de la participación del alumno en actividades escolares y de convivencia.
- Percepción de los docentes y de los compañeros sobre su integración al grupo.
- Cambios en la actitud y la disposición del alumno hacia la escuela tras recibir acompañamiento.

Unidad de análisis:
El alumno en duelo, en su contexto escolar y social inmediato.

Variable 2: Sensibilización y preparación del personal docente y directivo.
Atributos y propiedades:

- Conocimientos previos y actuales sobre el duelo infantil.
- Actitudes y disposición para acompañar a los alumnos que atraviesan una pérdida.
- Aplicación de estrategias de contención emocional en el aula.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID082

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

- Participación en actividades de capacitación y reflexión sobre el protocolo.

Indicadores cualitativos:

- Cambios en la manera en que los docentes abordan el duelo en el aula.
- Participación en talleres y espacios de sensibilización.
- Expresiones de empatía, escucha y comprensión hacia los alumnos en duelo.
- Percepción de los docentes sobre la utilidad del protocolo en su práctica educativa.

Unidad de análisis:
Docentes y directivos de las escuelas participantes.

En conjunto, estas variables y sus atributos permiten observar la transformación que se busca generar mediante la intervención: una escuela más consciente, empática y preparada para acompañar emocionalmente a sus alumnos.
Los indicadores cualitativos ayudan a identificar cambios significativos en las actitudes, percepciones y relaciones humanas dentro de la comunidad educativa, más allá de los resultados numéricos.
Así, las unidades de análisis —el alumno, los docentes y la comunidad escolar— representan distintos niveles de una misma realidad: la escuela como espacio de encuentro, aprendizaje y contención emocional. El análisis de estas dimensiones permite valorar el alcance del protocolo no solo como un documento técnico, sino también como una herramienta viva que transforma la manera de mirar, sentir y acompañar el duelo desde la educación.

2.5 Diseño de la intervención

Para cumplir con el objetivo del estudio, se propone realizar un taller de capacitación dirigido al personal docente y directivo de la zona escolar 02, que corresponde a las Escuelas Primarias Estatales de Gómez Palacio, Durango.

Nombre del taller “Acompañamiento y reintegración escolar de alumnos en duelo”
Duración sugerida: 8 horas (puede ajustarse)
Dirigido a: docentes, directivos y personal de apoyo de la educación primaria.
Zona Escolar: 02 primarias estatales en el municipio de Gómez Palacio, Durango.
Objetivo de la propuesta: brindar a los docentes herramientas humanas, emocionales y prácticas que les permitan el reconocimiento, la comprensión y el acompañamiento adecuados a los alumnos que atraviesan un proceso de duelo por la pérdida de un familiar directo, favoreciendo su reintegración al entorno escolar de manera respetuosa, segura y empática.

La duración del taller se ha diseñado para ocho sesiones; por razones de espacio, se muestran las planeaciones de las dos primeras sesiones en las Figuras 1 y 2.

Figura 1.
Planeación de la sesión 1 de la intervención

Propósito de la sesión 1 Que los docentes comprendan qué es el duelo infantil, cómo se manifiesta y qué cambios emocionales y conductuales pueden esperar en un alumno que regresa a clases después de una pérdida.				
TIEMPO	ACTIVIDAD	RECURSOS	EVALUACIÓN	PRODUCTO
1 hora	1. Bienvenida y encuadre del curso (20 min) • Presentación del objetivo general. • Dinámica rápida: “¿Qué palabra te viene a la mente cuando escuchas la palabra *duelo*?” • Establecimiento de acuerdos grupales (respeto, confidencialidad, escucha). 2. Exposición dialogada: ¿Qué es el duelo infantil? (30 min) • Duelo como proceso natural. • Diferencias entre duelo infantil y duelo adulto. • Reacciones comunes según la edad. • Mitos frecuentes en las escuelas (ej.: “los niños no entienden”, “es mejor no hablar del tema”). 3. Actividad en equipos: “Así reacciona un niño en duelo…” (40 min) • Se entregan tarjetas con situaciones reales. • Los equipos describen cómo podría reaccionar el alumno y cómo podría apoyarlo un docente. • Socialización con el grupo. 4. Cierre reflexivo (10 min) • Pregunta detonadora: “¿Qué reacciones he visto antes sin entender que eran parte del duelo?”	• Presentación digital. • Guía de duelo infantil. • Copia del Protocolo de Preparación y Sensibilización Escolar. • Tarjetas para dinámicas emocionales. • Proyector, bocinas	Puntualidad Asistencia Participación Aportaciones Respeto al expositor	Sensibilización al colectivo docente y administrativo

Fuente: elaboración propia.

Figura 2.
Planeación de la sesión 2 de la intervención

Propósito de la sesión 2 Brindar a los docentes herramientas emocionales y prácticas para acompañar a un alumno en duelo desde su primer día de regreso a clases.				
1 hora	1. Apertura con video breve (10 min) • Video sobre duelo infantil o experiencia escolar • Comentarios iniciales del grupo. 2. Exposición: “El docente como figura significativa” (30 min) • Lo que un alumno necesita al regresar. • Qué decir y qué evitar. • Importancia de la escucha y la presencia. • Límites del docente (cuándo pedir apoyo externo). 3. Simulación guiada (40 min) Situación: Un alumno regresa después de perder a su mamá o papá. • Un docente voluntario recibe al alumno (simulado por otro participante o por el instructor). • Observación grupal. • Retroalimentación positiva y sugerencias. 4. Trabajo por equipos: “Primer día de regreso: ¿qué haríamos?” (30 min) • Los equipos diseñan una pequeña guía de acciones para el día 1. • Socialización. 5. Cierre (10 min) • Cada docente escribe en una tarjeta: “Lo que sí puedo hacer por un alumno en duelo”.	• Proyector, bocinas • Tarjetas con descripción de situación. • Papel bond	Participación activa Aportaciones Respeto al expositor	guía de acciones tarjetas con acciones

2.6 Conceptualización de las variables cuantitativas.

La Tabla 1 presenta la conceptualización de la variable dependiente “Reincorporación integral de alumnos en duelo”.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID082

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Tabla 1
Desglose conceptual de la variable compleja reincorporación integral de alumnos en duelo (variable dependiente)

Identificador / nombre del ítem	*Concepto*
P1. Capacitación emocional docente	Docentes capacitados en el manejo del duelo. Participación en talleres o cursos
P2. Capacitación directivos	Proceso formativo dirigido a los directivos escolares para el desarrollo de competencias en la gestión del duelo y en la reincorporación emocional y académica de los alumnos.
P3. Acompañamiento docente	Apoyo emocional, técnico y profesional brindado a los docentes durante la reincorporación de alumnos en duelo
P4. Capacitación docente	Formación específica para los docentes en estrategias de acompañamiento, comunicación empática y detección de signos de duelo en el aula.
P5. Canalización	Derivación del alumno o de su familia a servicios especializados (psicología, trabajo social u otros) si así se requiere.
P6. Servicios extracurriculares	Recursos o apoyos internos a la escuela, (psicólogos o trabajadores sociales) que contribuyen al proceso de reincorporación
P7. Coordinación institucional	Organización y comunicación efectiva entre directivos, docentes, familia y servicios externos para planificar la reincorporación del alumno
P8. Sensibilización institucional	Proceso mediante el cual la comunidad escolar adquiere conciencia y empatía ante el impacto emocional del duelo infantil.
P9. Prácticas de reincorporación	Estrategias y acciones institucionales diseñadas para facilitar el retorno del alumno al entorno escolar.
P10. Comunicación constante	Interacción continua entre escuela y familia para garantizar apoyo coherente al alumno durante su proceso
P11. Seguimiento del proceso alumno	Observación y evaluación continua del progreso emocional, social y académico del alumno después de su retorno
P12. Seguimiento del proceso docente	Monitoreo del trabajo del docente en la implementación de estrategias de apoyo a los alumnos en duelo.
P13. Bitácora del caso	Documento o evidencia institucional en el que se consigna el seguimiento del proceso de cada alumno.
P14. Acciones de integración	Actividades que promueven la participación, convivencia y aceptación del alumno reincorporado dentro del grupo
P15. Fortalecimiento emocional	Acciones destinadas a ayudar al alumno a recuperar su equilibrio emocional y autoestima tras la pérdida
P16. Ambiente socioafectivo	Clima escolar caracterizado por la empatía, el respeto y la comprensión hacia el alumno en proceso de duelo
P17. Ajustes curriculares	Modificaciones en tareas, tiempos o evaluaciones que permiten una adaptación académica temporal.
P18. Sensibilización del personal de la escuela	Actividades orientadas a fortalecer la comprensión y la respuesta sensible de todo el personal
P19. Contención emocional	Estrategias de apoyo afectivo que permiten al alumno expresar y gestionar sus emociones.
P. 20 Identificación de signos de duelo	Capacidad del personal escolar para reconocer manifestaciones emocionales, conductuales o académicas relacionadas con el duelo

La Tabla 2 presenta la conceptualización de la variable independiente "Protocolo de preparación y sensibilización escolar".

Tabla 2
Desglose conceptual de la variable compleja Protocolo de Preparación y Sensibilización Escolar (variable independiente)

Identificador / nombre del ítem	*Concepto*
P21. Importancia del protocolo	Reconocimiento de la necesidad de contar con un instrumento formal
P22. Existencia del protocolo	Presencia de un documento o guía formal para la reincorporación de alumnos en duelo.
P23. Documentación del protocolo	Elaboración escrita del protocolo que establezca las acciones y lineamientos
P24. Difusión del protocolo	Conocimiento del protocolo por todo el personal escolar
P25. Apoyo emocional	Conjunto de estrategias específicas para contener y acompañar emocionalmente en el duelo
P26. Comunicación institucional	Lineamientos para informar a la comunidad educativa sobre la reincorporación del alumno en duelo, promoviendo respeto y empatía
P27. Estrategias didácticas	Actividades pedagógicas adaptadas para facilitar la reintegración emocional y académica del alumno.
P28. Enfoque tanatológico	Integración de fundamentos tanatológicos en el protocolo para una atención sensible y profesional del duelo.
P29. Coordinación con la familia	Colaboración activa entre escuela y familia para planificar el proceso
P30. Acompañamiento docente	Apoyo institucional al profesorado en la atención y contención
P31. Capacitación docente	Formación del personal docente en manejo emocional y estrategias de intervención ante el duelo infantil
P32. Formación específica	Inclusión de talleres o espacios formativos sobre duelo infantil y estrategias pedagógicas.
P33. Plan individualizado	Establecimiento de un plan de seguimiento personalizado para cada alumno reincorporado.
P34. Cultura de apoyo	Promoción de una cultura escolar basada en la empatía y el acompañamiento mutuo ante situaciones de pérdida.
P35. Percepción de padres de familia	Nivel de confianza y satisfacción de los padres respecto de la atención brindada a sus alumnos.
P36. Clima escolar empático	Entorno escolar que fomente la solidaridad y la comprensión ante el duelo.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID082

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

P37. Participación interdisciplinaria	Inclusión de diversos profesionales en la Creación y validación del protocolo
P38. Formación integral	Consideración del duelo como parte esencial de la preparación docente y directiva.
P39. Visibilización del duelo	Reconocimiento institucional de los alumnos en duelo como sujetos de atención prioritaria.
P40. Aplicación práctica	Ejemplos, actividades y estrategias concretas de la intervención escolar

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Posterior a la implementación de la intervención, se aplicó un instrumento estadístico cuantitativo, consistente en 40 preguntas en una escala de Likert de 5 puntos (de totalmente en desacuerdo a totalmente de acuerdo), para medir las percepciones y opiniones de los 52 participantes, docentes y directivos, respecto a la preparación y la sensibilización escolar y a la reincorporación integral de los alumnos en duelo.

Se describen los resultados de las estadísticas de tendencia central y de correlación, que muestran el comportamiento de las variables simples agrupadas según su variable compleja.

3.1 Resultados del análisis descriptivo

Para la variable compleja “Reincorporación integral de alumnos en duelo " (Figura 4) con un N de 52 sujetos se encontró un mínimo de 1, excepto en las preguntas 11, 14 16, 17 y 18 y un máximo de 4 todas las variables
La desviación estándar (DV) de las variables simples es menor que 1, por lo que los datos no están dispersos. Con respecto a las variables P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P9, cuyas DV son mayores que 1, se observa dispersión de los datos.
La asimetría de la mayoría de las variables simples es negativa, por lo que hay un sesgo hacia la derecha, excepto las variables P1, P2 y P3, que presentan una asimetría positiva, lo que indica que los valores se concentran por encima de la media.
La curtosis es positiva en la mayoría de las variables, lo que indica una forma leptocúrtica, mientras que las variables P1, P2, P4, P5, P6 y P9 presentan curtosis negativa, lo que indica una forma platicúrtica en la distribución de sus datos.
La mayoría de las variables presentan valores de Z superiores a 1.96, excepto P7, P10, P11, P12 y P19, lo que indica que son consistentes entre sí.

Para la variable compleja "Protocolo de Preparación y Sensibilización Escolar ", cuyo análisis descriptivo se muestra en la Figura 5, con un N de 52 sujetos, se observó un mínimo de 1 y un máximo de 4 en todas las variables.
La desviación estándar (DV) de las variables simples es mayor que 1, por lo que los datos no están dispersos, excepto en las preguntas P1, P30, P34, P35, P38 y P39. La asimetría de la mayoría de las variables simples es negativa, por lo que hay un sesgo hacia la derecha, excepto P31 y P32, que presentan una asimetría positiva. La curtosis es negativa en la mayoría de las variables, lo que indica una distribución leptocúrtica de los datos, excepto en P29, P34, P35, P37, P38 y P39. Todas las variables presentan valores de Z superiores a 1.96, lo que indica que son consistentes.

Figura 4
Análisis descriptivo de la variable reincorporación integral de alumnos en duelo

	Media	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Desv St	CV	Z	Coef Asim	Curtosis
P 1	2.22	2.00	1.00	1.00	4.00	1.22	55.14	1.81	0.32	-1.53
P2	2.35	2.00	3.00	1.00	4.00	1.07	45.63	2.19	0.05	-1.28
P3	2.45	3.00	1.00	1.00	4.00	1.22	49.85	2.01	0.02	-1.60
P4	2.35	2.00	3.00	1.00	4.00	1.00	42.35	2.36	-0.02	-1.10
P 5	3.00	3.00	4.00	1.00	4.00	1.17	38.87	2.57	-0.79	-0.90
P 6	3.18	4.00	4.00	1.00	4.00	1.16	36.55	2.74	-1.08	-0.44
P 7	3.59	4.00	4.00	1.00	4.00	0.73	20.23	4.94	-1.79	2.70
P 8	3.27	4.00	4.00	1.00	4.00	0.98	29.97	3.34	-1.12	0.06
P 9	2.96	3.00	4.00	1.00	4.00	1.12	37.98	2.63	-0.73	-0.86
P 10	3.65	4.00	4.00	1.00	4.00	0.69	18.86	5.30	-2.48	6.98
P 11	3.69	4.00	4.00	2.00	4.00	0.58	15.81	6.33	-1.73	2.06
P 12	3.59	4.00	4.00	1.00	4.00	0.70	19.45	5.14	-1.80	3.12
P 13	3.51	4.00	4.00	1.00	4.00	0.78	22.34	4.48	-1.72	2.64
P 14	3.65	4.00	4.00	2.00	4.00	0.56	15.34	6.52	-1.33	0.89
P 15	3.29	3.00	3.00	1.00	4.00	0.73	22.14	4.52	-0.85	0.59
P 16	3.59	4.00	4.00	2.00	4.00	0.61	16.88	5.92	-1.20	0.47
P 17	3.69	4.00	4.00	2.00	4.00	0.55	14.85	6.73	-1.56	1.63
P 18	3.69	4.00	4.00	2.00	4.00	0.55	14.85	6.73	-1.56	1.63
P 19	3.69	4.00	4.00	1.00	4.00	0.62	16.71	5.98	-2.36	6.66
P 20	3.63	4.00	4.00	1.00	4.00	0.72	19.85	5.04	-1.97	3.33

Figura 5
Análisis descriptivo de la variable compleja " Protocolo de Preparación y Sensibilización Escolar "

	Media	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Desv St	CV	Z	oef Asimeti	Curtosis
P 21	2.98	3.00	3.00	1.00	4.00	0.95	31.82	3.14	-0.69	-0.33
P 22	2.47	3.00	3.00	1.00	4.00	1.16	46.75	2.14	-0.13	-1.46
P 23	2.49	3.00	3.00	1.00	4.00	1.14	45.70	2.19	-0.06	-1.40
P 24	2.45	2.00	3.00	1.00	4.00	1.10	44.93	2.23	0.04	-1.31
P 25	2.80	3.00	4.00	1.00	4.00	1.17	41.60	2.40	-0.47	-1.26
P 26	2.65	3.00	4.00	1.00	4.00	1.18	44.59	2.24	-0.25	-1.43
P 27	2.61	3.00	3.00	1.00	4.00	1.15	44.11	2.27	-0.23	-1.37
P 28	2.63	3.00	3.00	1.00	4.00	1.13	43.03	2.32	-0.24	-1.32
P 29	2.73	3.00	4.00	1.00	4.00	1.17	42.84	2.33	-0.38	-1.33
P 30	3.20	3.00	4.00	1.00	4.00	0.98	30.67	3.26	-1.08	0.16
P 31	2.41	2.00	2.00	1.00	4.00	1.13	47.04	2.13	0.14	-1.37
P 32	2.31	2.00	3.00	1.00	4.00	1.03	44.49	2.25	0.01	-1.23
P 33	2.57	3.00	3.00	1.00	4.00	1.15	44.90	2.23	-0.21	-1.40
P 34	3.14	3.00	4.00	1.00	4.00	0.96	30.59	3.27	-0.99	0.13
P 35	3.08	3.00	3.00	1.00	4.00	0.98	31.72	3.15	-0.97	0.08
P 36	3.10	3.00	4.00	1.00	4.00	1.01	32.44	3.08	-0.94	-0.14
P 37	3.39	4.00	4.00	1.00	4.00	0.96	28.32	3.53	-1.58	1.47
P 38	3.25	4.00	4.00	1.00	4.00	0.93	28.72	3.48	-1.15	0.47
P 39	3.35	4.00	4.00	1.00	4.00	0.84	25.18	3.97	-1.18	0.65
P 40	2.92	3.00	3.00	1.00	4.00	1.06	36.12	2.77	-0.79	-0.50

3.2 Resultados del análisis correlacional

Se realizó el análisis de correlación de Pearson con un nivel de confianza del 95% (α = 0.05) para determinar la relación entre las variables estudiadas. Los resultados del análisis se muestran en la Figura 6.

Figura 6
Análisis correlacional de las variables cuantitativas

	P 1	P 2	P 3	P 4	P 22	P 23	P 25	P 26	P 27	P 28	P 29	P 31	P 32
P 1	1.00	0.72	0.86	0.71		0.70			0.70			0.81	0.71
P 2	0.72	1.00	0.80	0.78					0.73				
P3	0.86	0.80	1.00	0.78	0.75	0.80		0.75	0.75	0.78	0.72	0.78	
P 4	0.71	0.78	0.78	1.00	0.73	0.75							
P 22			0.75	0.73	1.00	0.79	0.75	0.73				0.73	
P 23	0.70		0.80	0.75	0.79	1.00	0.81	0.80		0.78	0.86	0.71	0.71
P 25					0.75	0.81	1.00	0.91	0.82	0.76	0.90	0.78	0.77
P 26			0.75		0.73	0.80	0.91	1.00	0.78	0.80	0.87	0.79	0.79
P 27	0.70	0.73	0.75				0.82	0.78	1.00	0.78	0.83	0.76	0.72
P 28			0.78			0.78	0.76	0.80	0.78	1.00	0.81	0.73	0.72
P 29			0.72			0.86	0.90	0.87	0.83	0.81	1.00	0.77	0.81
P 31	0.81		0.78		0.73	0.71	0.78	0.79	0.76	0.73	0.77	1.00	0.86
P 32	0.71					0.71	0.77	0.79	0.72	0.72	0.81	0.86	1.00
P 33								0.71		0.76	0.73		

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID082

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La lectura inferencial estadística de los resultados significativos es la siguiente:

1. A mayor número de espacios formativos sobre el protocolo, dirigidos a directivos y docentes a través de talleres formativos sobre el manejo del duelo infantil, con énfasis en actividades pedagógicas adaptadas y en un mayor apoyo emocional, técnico y profesional, mayor apoyo pueden brindar al alumno para su reincorporación integral a las actividades de aprendizaje en el centro escolar.
2. Una mayor capacitación de docentes y directivos, con estrategias adaptadas para la integración académica y la contención emocional, mejorará el apoyo técnico y profesional brindado a los alumnos en proceso de reincorporación tras el fallecimiento de familiares cercanos.
3. A mayor número de espacios formativos con enfoque tanatológico sobre el protocolo hacia directivos y docentes, a través de talleres formativos sobre lineamientos de actuación y manejo del duelo infantil, con énfasis en actividades pedagógicas adaptadas, mayor apoyo emocional, técnico y profesional pueden brindar al alumno para su reincorporación integral a las actividades de aprendizaje en el centro escolar y la colaboración activa entre la escuela y la familia.
4. A mayor implementación de lineamientos de comunicación y de capacitación docente sobre el protocolo de incorporación de alumnos en duelo a las actividades escolares, mayor apoyo emocional, estrategias de contención y de acompañamiento recibirán los alumnos en duelo.
5. A mayor establecimiento de planes de seguimiento individualizados, con enfoque tanatológico, en el diseño e implementación del protocolo, como parte de la capacitación de los colectivos docentes, mayor es la contención emocional de los alumnos en duelo para su reintegración a las actividades de aprendizaje escolar.

Este análisis es fundamental, ya que muestra con claridad el papel que desempeñan la capacitación docente y directiva, así como la existencia y la aplicación de protocolos escolares, en los procesos de acompañamiento y reincorporación de alumnos que atraviesan un duelo.

3.3 Valoración de las hipótesis

En esta sección se presentan las respuestas finales a las hipótesis planteadas en la investigación. El objetivo es explicar, de manera ordenada y comprensible, cómo los resultados permiten aceptar o rechazar cada una de ellas, y qué implicaciones tienen estos hallazgos para la práctica educativa.
En el análisis de la información recolectada, se identificaron relaciones significativas entre diversos factores institucionales, como el apoyo emocional, la comunicación interna, las estrategias didácticas y la coordinación con la familia, y las acciones concretas que la escuela implementa cuando un estudiante enfrenta la pérdida de un ser querido. Estas evidencias permiten valorar si las hipótesis pueden aceptarse o rechazarse y muestran objetivamente cómo influyen las prácticas formativas y organizacionales en el bienestar del alumnado en duelo.
Las conclusiones derivadas del análisis de las hipótesis sirven de punto de partida para mejorar la propuesta de intervención diseñada.

La hipótesis H_1: la aplicación del Protocolo de Preparación y Sensibilización Escolar contribuye de manera significativa a la reincorporación integral de los alumnos en duelo.
No se puede rechazar, ya que se relaciona con la Existencia del protocolo, la Difusión del protocolo, el Apoyo emocional, la Comunicación institucional, las Estrategias didácticas, la Coordinación con la familia y la capacitación docente.

La hipótesis H_2: La sensibilización del personal docente sobre el duelo infantil mejora su capacidad para acompañar emocionalmente a los alumnos.
Se acepta, ya que la contención emocional se relaciona con las siguientes variables: existencia del protocolo, documentación del protocolo, apoyo emocional, comunicación institucional, estrategias didácticas, enfoque tanatológico, coordinación con la familia, capacitación docente, formación específica, plan individualizado, visibilización del duelo y aplicación práctica.

La hipótesis H_3: La implementación de estrategias escolares basadas en la empatía y el respeto favorece la integración social y emocional de los estudiantes en duelo.
Se acepta parcialmente, ya que se relaciona con la existencia del protocolo y con su documentación.

Con respecto a la hipótesis H_4: La existencia de un protocolo institucional influye en el proceso de reincorporación de los alumnos en duelo al entorno escolar.
Se cumple porque se relaciona con la existencia del protocolo, su documentación y difusión, el apoyo emocional, la comunicación institucional, las estrategias didácticas, el enfoque tanatológico, la coordinación con la familia, la capacitación docente, la formación específica y el plan individualizado.

3.4 Discusión

El análisis de la información evidenció que las instituciones educativas carecen de procedimientos estandarizados para atender la reincorporación escolar de estudiantes en duelo. Los participantes señalaron que las acciones implementadas dependen, en gran medida, de la experiencia de docentes y directivos, lo que genera respuestas heterogéneas y limita una atención institucional sistemática. La ausencia de protocolos específicos confirma que la atención suele depender de la experiencia individual de docentes y directivos, lo que dificulta ofrecer respuestas homogéneas y oportunas.
Asimismo, se identificó la necesidad de fortalecer la formación del personal educativo en temas relacionados con el duelo infantil, el acompañamiento socioemocional y la comunicación con las familias. Los participantes coincidieron en que contar con orientaciones claras favorece una intervención más oportuna y pertinente.
Otro hallazgo relevante fue la importancia de consolidar la colaboración entre la escuela y la familia durante el proceso de reincorporación del estudiante. La comunicación permanente y el trabajo conjunto fueron identificados como elementos esenciales para brindar apoyo emocional y favorecer la adaptación al entorno escolar.
Estos hallazgos coinciden con lo señalado por Worden (2004), quien sostiene que el acompañamiento en el duelo requiere estrategias planificadas que favorezcan la adaptación emocional de quienes experimentan una pérdida significativa. De igual

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID082

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

manera, la teoría del apego de Bowlby (1982) destaca la importancia de que niñas y niños encuentren en la escuela un entorno seguro que contribuya a recuperar la estabilidad y la confianza durante este proceso.

La investigación también pone de manifiesto la relevancia del trabajo colaborativo entre escuela y familia, ya que una comunicación permanente facilita la identificación de necesidades y el diseño de estrategias de apoyo acordes con cada estudiante. En este sentido, el protocolo propuesto constituye una herramienta que favorece la organización institucional y fortalece la atención socioemocional desde un enfoque preventivo e inclusivo.

De acuerdo con Lewin (1946), los procesos de cambio social son más efectivos cuando las personas afectadas participan activamente en el análisis del problema y en la construcción de las soluciones. Esto fue lo que sucedió en este proyecto: los maestros y directivos no solo recibieron instrucciones, sino que también formaron parte activa del proceso. La reflexión colectiva generó un compromiso genuino y un cambio duradero.

En conjunto, los hallazgos respaldan la pertinencia de incorporar protocolos escolares para la atención del duelo como parte de las acciones orientadas al bienestar integral del alumnado, promoviendo ambientes educativos más sensibles, humanistas y preparados para responder a situaciones de pérdida significativa.

IV. CONCLUSIONES

El diseño del Protocolo de Preparación y Sensibilización Escolar para la Reincorporación Integral de Alumnos en Duelo constituye una propuesta orientada a responder a esta necesidad, al ofrecer una guía estructurada que promueve la participación coordinada de directivos, docentes y familias durante el proceso de reincorporación escolar. Su elaboración se fundamentó en las necesidades identificadas en el contexto educativo y en los aportes de la literatura especializada sobre duelo infantil y acompañamiento escolar.

Asimismo, el estudio confirma la importancia de incorporar estrategias preventivas que fortalezcan la formación socioemocional de la comunidad educativa y favorezcan ambientes escolares más empáticos, inclusivos y sensibles ante situaciones de pérdida significativa. La existencia de protocolos institucionales puede contribuir a brindar mayor seguridad a los docentes durante la atención de estos casos y fortalecer la continuidad educativa del alumnado.

En conclusión, se considera que esta propuesta representa una alternativa viable para enriquecer las prácticas de atención socioemocional en las escuelas de educación básica y abre nuevas posibilidades para futuras investigaciones orientadas a evaluar su implementación y su impacto en distintos contextos educativos.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a las autoridades educativas, directivos, docentes y familias de las instituciones participantes por su disposición y colaboración durante el desarrollo de la investigación. Su experiencia, compromiso y aportaciones hicieron posible comprender las necesidades existentes en torno a la atención escolar de estudiantes en proceso de duelo y fortalecer la propuesta presentada.

Asimismo, se reconoce el apoyo brindado por la comunidad educativa de la Zona Escolar 02 del Sector Educativo 03 de Educación Primaria Estatal de Gómez Palacio, Durango, cuya participación fue fundamental para el desarrollo de las diferentes etapas del estudio y la validación del Protocolo de Preparación y Sensibilización Escolar para la Reincorporación Integral de Alumnos en Duelo.

Gracias a todas las personas e instituciones que, desde sus respectivos ámbitos de actuación, contribuyeron al fortalecimiento académico y metodológico de esta investigación, reafirmando el compromiso compartido con la construcción de escuelas más inclusivas, empáticas y preparadas para brindar acompañamiento socioemocional a niñas, niños y adolescentes.

Finalmente, se agradece al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo y a la Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo TecLerdo por los espacios de difusión académica y científica brindados para la socialización de investigaciones educativas orientadas al desarrollo integral de las niñas y los niños del estado de Durango.

VI. REFERENCIAS

Ainsworth, M. D. S., Blehar, M. C., Waters, E., & Wall, S. (1978). *Patterns of attachment: A psychological study of the strange situation.* Lawrence Erlbaum Associates.

Bisquerra, R. (2000). *Educación emocional y bienestar*. Praxis.

Bisquerra, R. (2013). *Emociones y educación: La educación emocional en la escuela*. Desclée de Brouwer.

Bowlby, J. (1982). *Attachment and loss: Vol. 1. Attachment* (2nd ed.). Basic Books.

Bronfenbrenner, U. (1987). *La ecología del desarrollo humano*. Paidós.

Corr, C. A., Corr, D. M., & Nabe, C. M. (2019). *Death and dying, life and living* (9th ed.). Cengage Learning.

Cyrulnik, B. (2003). *Los patitos feos: La resiliencia, una infancia infeliz no determina la vida*. Gedisa.

Dyregrov, A. (2011). *Supporting traumatized children and teenagers: A guide to providing understanding and help*. Jessica Kingsley Publishers.

Goleman, D. (2023). *Inteligencia emocional: Cómo las emociones intervienen en nuestra vida* (2.ª ed.). Editorial Reverté.

Kübler-Ross, E. (1969). *On death and dying*. Macmillan.

Lewin, K. (1946). *Action research and minority problems*. *Journal of Social Issues, 2*(4), 34–46. https://doi.org/10.1111/j.1540-4560.1946.tb02295.x

Melendo, T. (1998). *El sentido del sufrimiento y la muerte*. Ediciones Rialp.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Noddings, N. (2002). *Starting at home: Caring and social policy*. University of California Press.

Rogers, C. R. (1961). *On becoming a person: A therapist's view of psychotherapy*. Houghton Mifflin.

Secretaría de Educación Pública. (2017). *Aprendizajes clave para la educación integral: Plan y programas de estudio para la educación básica*. Secretaría de Educación Pública.

Secretaría de Educación Pública. (2022). *Plan de estudio para la educación preescolar, primaria y secundaria 2022*. Gobierno de México. https://educacionbasica.sep.gob.mx/wp-content/uploads/2024/06/Plan-de-Estudio-ISBN-ELECTRONICO.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2008). *La educación inclusiva: El camino hacia el futuro*. UNESCO.

Vygotsky, L. S. (1979). *El desarrollo de los procesos psicológicos superiores*. Crítica.

Worden, J. W. (2004). *El tratamiento del duelo: Asesoramiento psicológico y terapia* (2.ª ed.). Paidós.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización	Adán Emilio Cabrales Valenzuela
2	Curación de datos	Adán Emilio Cabrales Valenzuela; Jorge Fernando Vargas Lerma
3	Análisis formal	Adán Emilio Cabrales Valenzuela; Jorge Fernando Vargas Lerma
4	Obtención de fondos	*No aplica*
5	Investigación	Adán Emilio Cabrales Valenzuela
6	Metodología	Adán Emilio Cabrales Valenzuela; Elda Moreno Núñez
7	Administración del proyecto	Gerardo de Jesús Garza Rosales
8	Recursos	Gerardo de Jesús Garza Rosales
9	Software	Elda Moreno Núñez, Jorge Fernando Vargas Lerma
10	Supervisión	Gerardo de Jesús Garza Rosales
11	Validación	Jorge Fernando Vargas Lerma
12	Visualización	Elda Moreno Núñez
13	Redacción - borrador original	Adán Emilio Cabrales Valenzuela, Gerardo de Jesús Garza Rosales
14	Redacción - revisión y edición	Elda Moreno Núñez, Jorge Fernando Vargas Lerma

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID082

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Diseño y Construcción de una Máquina Semiautomática para el Corte de Embutidos en Cubos Uniformes

Design and Construction of a Semi-automatic Machine for Cutting Sausages into Uniform Cubes

Vaquera-González, E.[1]

Datos de Adscripción:
[1] Vaquera González, Efraín
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Ingeniería en Sistemas
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
efrain.vg@itslerdo.edu.mx
https://orcid.org/0009-0002-9123-6977

Resumen **- El presente estudio tiene como objetivo diseñar y construir una máquina semiautomática para el corte de embutidos tipo salchicha en cubos uniformes de cinco centímetros, con la finalidad de mejorar la eficiencia en el proceso de preparación y empaque en la industria alimentaria. El alcance del trabajo abarca desde el diseño mecánico y estructural hasta la implementación de un sistema neumático de accionamiento. La metodología empleada consistió en el desarrollo de una estructura de soporte con perfil ptr, la integración de una mesa de acero inoxidable y la instalación de dos cilindros neumáticos que generan el desplazamiento del producto hacia un sistema de corte basado en una malla metálica con geometría cuadrada. El funcionamiento del equipo se activa mediante un pedal neumático que permite el control del proceso, facilitando el empuje del embutido contra la malla de corte, produciendo cubos homogéneos. El producto resultante es conducido mediante una tolva hacia el área de empaque, donde se dosifica en presentaciones comerciales. Los resultados obtenidos muestran una mejora significativa en la uniformidad del corte y una reducción en los tiempos de procesamiento. Se concluye que la máquina desarrollada representa una solución eficiente y de bajo costo para la automatización parcial del corte de embutidos, contribuyendo a la estandarización del producto y a la optimización del proceso productivo.**

Palabras Clave: Automatización, Corte, Embutidos, Neumática, Procesos, Uniformidad

Abstract **- The present study aims to design and construct a semi-automatic machine for cutting sausage-type processed meat into uniform five-centimeter cubes, with the purpose of improving efficiency in preparation and packaging processes within the food industry. The scope of the work ranges from mechanical and structural design to the implementation of a pneumatic actuation system. The methodology employed consisted of developing a support structure using steel profiles, integrating a stainless steel worktable, and installing two pneumatic cylinders that generate the displacement of the product toward a cutting system based on a square-shaped metallic grid. The operation of the equipment is activated by a pneumatic pedal that allows process control, facilitating the pushing of the sausage against the cutting grid to produce uniform cubes. The resulting product is guided through a hopper to the packaging area, where it is portioned into commercial presentations. The results obtained show a significant improvement in cutting uniformity and a reduction in processing times. It is concluded that the developed machine represents an efficient and low-cost solution for the partial automation of sausage cutting, contributing to product standardization and process optimization.**

Keywords: Automation, Cutting, Pneumatics, Processes, Sausages, Uniformity

I. INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria enfrenta el desafío de mejorar la eficiencia de los procesos productivos sin comprometer la calidad e inocuidad de los productos. En particular, el procesamiento de embutidos requiere operaciones precisas que garanticen uniformidad en tamaño, forma y presentación, factores que influyen directamente en la aceptación del consumidor y en la estandarización de los procesos posteriores, como el empaque y la cocción (Fellows, 2017). Dentro de estas operaciones, el corte del producto representa una etapa crítica, ya que de su precisión depende en gran medida la calidad final del alimento.

Tradicionalmente, en pequeñas y medianas empresas, el corte de embutidos se realiza de manera manual o mediante herramientas de baja complejidad, lo que genera una alta variabilidad en las dimensiones del producto y limita la capacidad de producción. Esta situación no solo afecta la uniformidad del producto, sino que también incrementa los tiempos de procesamiento, los costos operativos y la dependencia de la habilidad del operario. De acuerdo con Singh y Heldman (2014), la mecanización de los procesos en la industria alimentaria permite mejorar la eficiencia y reducir la variabilidad, aspectos fundamentales para garantizar la calidad en la producción.

En contraste, las soluciones industriales disponibles en el mercado, como equipos completamente automatizados para el corte de alimentos, ofrecen altos niveles de precisión y productividad; sin embargo, su elevado costo de adquisición, operación y mantenimiento limita su implementación en unidades productivas de menor escala (Rahman, 2009). Esta brecha tecnológica evidencia la necesidad de desarrollar soluciones

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID083

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

intermedias que combinen eficiencia, accesibilidad económica y facilidad de operación.

Desde el punto de vista de la ingeniería, el diseño de maquinaria para la industria alimentaria implica la integración de múltiples disciplinas, incluyendo el diseño mecánico, la selección de materiales, la automatización y la ergonomía. En este sentido, el uso de materiales como el acero inoxidable resulta fundamental debido a sus propiedades de resistencia a la corrosión, durabilidad y cumplimiento de normativas sanitarias (Smith & Hashemi, 2010). Asimismo, la implementación de sistemas neumáticos representa una alternativa eficiente para la automatización parcial de procesos, debido a su simplicidad, bajo costo relativo y facilidad de mantenimiento (Parr, 2011).

Por otra parte, la uniformidad en el corte de los alimentos es un factor clave en la estandarización de los procesos industriales, ya que influye en variables como el tiempo de cocción, la distribución térmica y la presentación del producto final (Barbosa-Cánovas et al., 2005). En el caso específico del corte en cubos, se requiere un sistema que garantice precisión geométrica y repetibilidad, lo cual puede lograrse mediante el uso de mecanismos guiados y elementos de corte diseñados bajo criterios específicos de ingeniería.

Esta investigación se enfoca en el diseño y fabricación de una máquina semiautomática para el corte de embutidos en cubos uniformes, orientada a atender las necesidades de pequeñas y medianas empresas del sector alimentario. La propuesta integra un sistema mecánico y neumático que permite mejorar la eficiencia del proceso de corte, reducir la intervención manual y garantizar la uniformidad del producto.

La investigación describe de manera detallada el proceso de diseño tridimensional, la selección de materiales, el desarrollo del sistema neumático, la fabricación del equipo y las pruebas de funcionamiento realizadas. Asimismo, se presentan los resultados obtenidos, evidenciando la viabilidad técnica del sistema propuesto como una alternativa accesible y funcional para la optimización de procesos en la industria alimentaria.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Descripción de la problemática

En el sector de procesamiento de alimentos, particularmente en la producción de embutidos, el corte del producto en porciones uniformes representa una etapa crítica dentro de la cadena productiva. En muchas pequeñas y medianas empresas, este proceso se realiza de manera manual o mediante herramientas rudimentarias, lo que genera inconsistencias en las dimensiones del producto final. Esta variabilidad no solo afecta la presentación estética, sino también la calidad del producto, el control de porciones y la estandarización requerida para su comercialización.

Adicionalmente, el corte manual implica una alta dependencia de la habilidad del operario, lo que incrementa la probabilidad de errores y reduce la eficiencia del proceso. Esta situación se traduce en tiempos de producción más prolongados, incremento en los costos operativos y un mayor desgaste físico del trabajador, lo que puede derivar en problemas ergonómicos y riesgos laborales. A esto se suma la limitada accesibilidad a maquinaria industrial automatizada, ya que los equipos disponibles en el mercado suelen tener costos elevados y están diseñados para grandes volúmenes de producción, lo cual resulta poco viable para unidades productivas de menor escala.

Por otra parte, la falta de uniformidad en el corte dificulta la implementación de procesos posteriores, como el empaquetado y la cocción homogénea, afectando directamente la calidad del producto final. En consecuencia, existe una necesidad latente de desarrollar soluciones tecnológicas intermedias que permitan mejorar la precisión del corte sin requerir inversiones excesivas ni sistemas altamente complejos.

2.2 Propuesta de solución

Ante esta problemática, se propone el diseño y manufactura de una máquina semiautomática para el corte de embutidos en cubos uniformes, que permita optimizar el proceso de corte mediante la incorporación de mecanismos mecánicos eficientes y de fácil operación. Esta solución busca reducir la intervención manual directa, garantizando al mismo tiempo una mayor precisión y repetibilidad en las dimensiones del producto.

La máquina está concebida bajo criterios de funcionalidad, accesibilidad y seguridad, integrando componentes que faciliten su fabricación y mantenimiento. Su diseño contempla el uso de materiales aptos para contacto con alimentos, así como un sistema de corte que permita obtener cubos de dimensiones homogéneas mediante un mecanismo guiado y controlado. Asimismo, al tratarse de un sistema semiautomático, se logra un equilibrio entre la automatización del proceso y la reducción de costos, haciéndolo viable para pequeñas y medianas empresas.

Entre los beneficios esperados se encuentran la disminución del tiempo de procesamiento, la mejora en la calidad y uniformidad del producto, la reducción del esfuerzo físico del operario y el incremento en la eficiencia general del sistema productivo. De esta manera, la propuesta contribuye a fortalecer la competitividad del sector, ofreciendo una alternativa tecnológica adecuada a las necesidades reales de la industria local.

2.2.1 Metodología experimental

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo experimental aplicado, con el objetivo de diseñar, construir y evaluar el desempeño de una máquina semiautomática para el corte de embutidos en cubos uniformes. Se realizó una revisión bibliográfica y técnica sobre procesos de corte en la industria alimentaria, así como de mecanismos utilizados en máquinas similares. Con base en esta información, se definieron los requerimientos funcionales del sistema, tales como:

- Dimensiones del producto a procesar
- Tamaño del corte (cubos uniformes)
- Capacidad de producción

Posteriormente, se generaron propuestas de solución mediante modelos CAD, seleccionando la alternativa más viable con base en criterios de factibilidad técnica y económica.

2.3 Diseño 3D de la máquina

El diseño tridimensional de la máquina semiautomática para el corte de embutidos en cubos uniformes fue desarrollado utilizando el software NX de Siemens (como se muestra en la

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID083

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

figura 1), herramienta ampliamente utilizada en el ámbito de la ingeniería para el modelado, simulación y análisis de sistemas mecánicos. Este entorno permitió la integración de los componentes del sistema, facilitando la visualización del ensamble, la detección de interferencias y la optimización del diseño antes de su construcción física.

La estructura principal de la máquina está conformada por un bastidor fabricado con perfiles cuadrados de acero inoxidable de 3 x 3 pulgadas, lo que proporciona la rigidez y estabilidad necesarias durante la operación. Las dimensiones generales del equipo son de 1.35 m de largo, 0.90 m de ancho y 1.00 m de altura, lo cual permite su adecuada integración en espacios de trabajo industriales sin comprometer la ergonomía del operario.

En cuanto a los materiales, se seleccionó acero inoxidable de grado alimenticio para la mayoría de los elementos en contacto con el producto, debido a sus propiedades de resistencia a la corrosión, facilidad de limpieza y cumplimiento de normativas sanitarias en la industria alimentaria. Esta elección garantiza condiciones higiénicas adecuadas durante el procesamiento de los embutidos.

El sistema de corte está basado en el accionamiento de pistones neumáticos de acero inoxidable (Figura 2), los cuales generan el movimiento lineal necesario para empujar el embutido a través de una rejilla de corte ubicada al final del recorrido (Figura 3). Dicha rejilla presenta una configuración cuadrática con aberturas de 3 cm x 3 cm, permitiendo obtener cubos uniformes de estas dimensiones. Este diseño asegura la repetibilidad del proceso y la estandarización del producto final.

Para el control del sistema, se incorporó un pedal neumático, el cual permite al operario accionar los pistones de manera segura y eficiente, manteniendo las manos libres durante la operación. Este elemento contribuye a mejorar la ergonomía y reducir riesgos laborales asociados al proceso de corte.

El modelo tridimensional desarrollado no solo permitió definir la disposición espacial de los componentes, sino también validar el funcionamiento del mecanismo propuesto, asegurando que el diseño cumpla con los requerimientos de funcionalidad, seguridad y manufacturabilidad. En la Figura 1 se muestra el diseño 3D final de la máquina.

Figura 1
Diseño 3D de la máquina cortadora de embutidos.

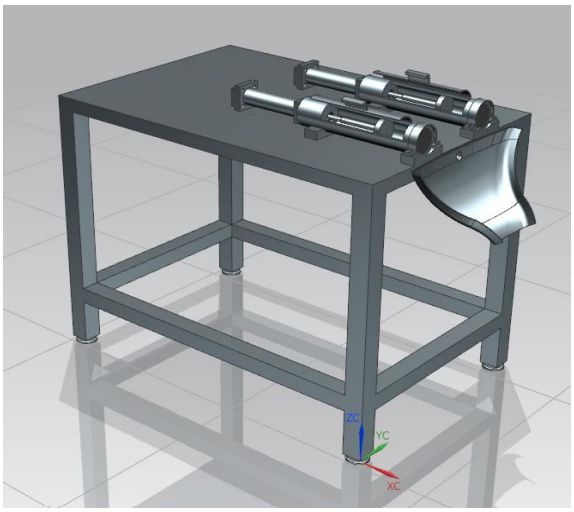


Figura 2
Pistones neumáticos.

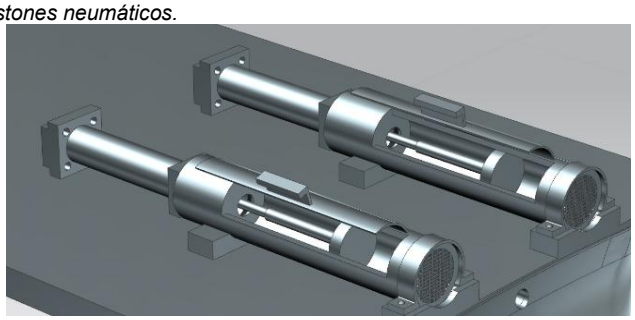
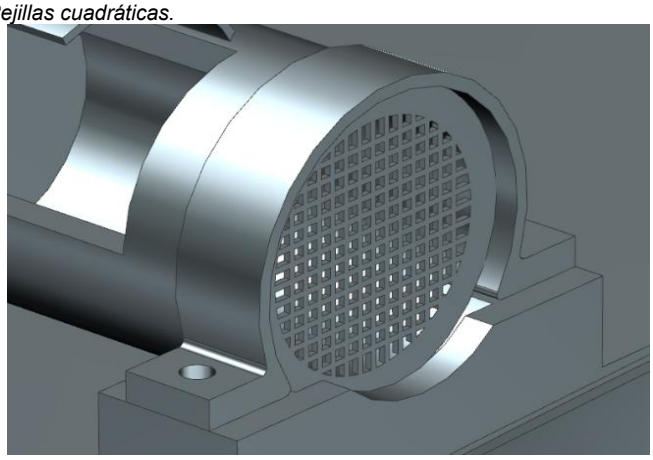


Figura 3
Rejillas cuadráticas.



2.4 Diseño neumático

El sistema neumático de la máquina (Figura 4) fue diseñado para accionar el mecanismo de corte de manera eficiente, segura y controlada, utilizando aire comprimido como fuente de energía. Este sistema permite transformar la energía neumática en movimiento lineal, el cual es empleado para impulsar los embutidos a través de la rejilla de corte, garantizando uniformidad en el producto final.

El diseño contempla la utilización de dos cilindros neumáticos de acero inoxidable con dimensiones de 50 mm de diámetro y 600 mm de carrera, seleccionados en función de la fuerza requerida para el desplazamiento del producto y la longitud necesaria para completar el recorrido de corte. Estos cilindros operan de manera sincronizada, permitiendo una distribución uniforme de la fuerza aplicada sobre el embutido.

El control del movimiento de los cilindros se realiza mediante una válvula direccional 5/2 de pilotaje neumático, la cual permite alternar el suministro de aire entre las cámaras de los cilindros para generar los movimientos de avance y retroceso. El accionamiento del sistema se lleva a cabo a través de un pedal neumático, proporcionando al operario un control sencillo y seguro del proceso, además de mantener libres las manos durante la operación.

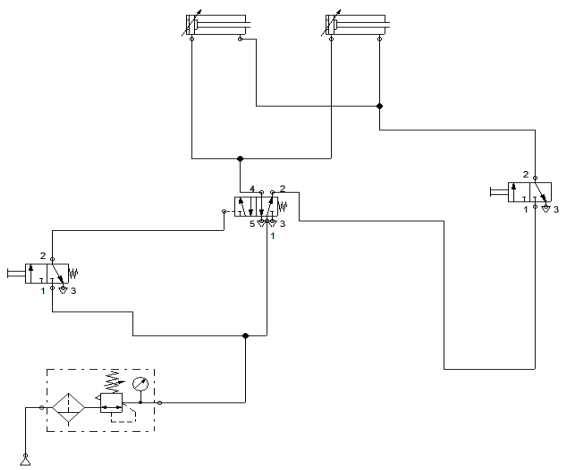
Para regular la velocidad de avance y retorno de los cilindros, se incorporaron cuatro reguladores de flujo, los cuales permiten ajustar el caudal de aire en puntos estratégicos del sistema. Esto es fundamental para evitar movimientos bruscos que puedan afectar la integridad del producto o del equipo. Asimismo, el

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID083

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

sistema incluye silenciadores instalados en las salidas de aire, con el objetivo de reducir el nivel de ruido generado durante la descarga del aire comprimido.
La red de conducción del aire está conformada por mangueras de 8 mm de diámetro, conectadas mediante conectores neumáticos de 8 mm con rosca de 3/8 y 1/4 de pulgada, así como conexiones tipo “T”, que permiten la adecuada distribución del flujo de aire hacia los diferentes componentes del sistema. Esta configuración facilita el ensamble, mantenimiento y posibles modificaciones del sistema neumático.
El acondicionamiento del aire comprimido se realiza mediante una unidad FRL (filtro, regulador y lubricador) de 3/8 de pulgada, la cual garantiza que el aire suministrado esté limpio, con la presión conveniente y con la lubricación idónea para prolongar la vida útil de los componentes neumáticos. Adicionalmente, se incorporó una válvula de corte manual, que permite interrumpir el suministro de aire de manera rápida en caso de mantenimiento o emergencia.
El funcionamiento del sistema inicia cuando el operario acciona el pedal neumático, enviando una señal de pilotaje a la válvula 5/2. Esta válvula dirige el flujo de aire hacia la cámara correspondiente de los cilindros, provocando su extensión y generando el empuje del embutido hacia la rejilla de corte. Una vez completado el recorrido, la válvula invierte su posición, permitiendo el retorno de los cilindros a su posición inicial, preparando el sistema para un nuevo ciclo de operación.

Figura 4
Diagrama Neumático.



2.5 Adquisición de componentes neumáticos

Para la implementación del sistema neumático de la máquina, fue necesaria la selección y adquisición de diversos componentes especializados, como se muestra en la figura 5, los cuales permitieron garantizar el correcto funcionamiento, control y eficiencia del sistema de accionamiento.
Entre los elementos principales se encuentran los cilindros neumáticos de acero inoxidable con dimensiones de 50 mm de diámetro y 600 mm de carrera, seleccionados por su capacidad de generar la fuerza requerida para el proceso de corte.
Asimismo, se adquirieron reguladores de flujo, conectores neumáticos, conexiones tipo “T” y mangueras de 8 mm, los cuales permiten la adecuada distribución y control del aire comprimido dentro del sistema. Para el control direccional del flujo de aire, se incorporó una válvula 5/2 de pilotaje neumático, así como un pedal neumático que facilita el accionamiento del sistema por parte del operario.
El sistema también incluye elementos auxiliares fundamentales como la unidad de mantenimiento FRL (filtro, regulador y lubricador), encargada de acondicionar el aire comprimido, y una válvula de corte manual, que permite interrumpir el suministro de aire en situaciones de mantenimiento o emergencia. De igual forma, se integraron silenciadores neumáticos, cuya función es reducir el nivel de ruido generado durante la operación del sistema.
La correcta selección de estos componentes, considerando sus especificaciones técnicas y compatibilidad, permitió la construcción de un sistema neumático funcional, seguro y adecuado para las necesidades del proyecto, contribuyendo de manera directa al desempeño eficiente de la máquina desarrollada.

Figura 5
Elementos neumáticos adquiridos.

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCION	T. ENTREGA	P.UNITARIO	TOTAL
1	2	Cilindro inoxidable 50mm x 600mm	5 dias	$ 3,650.00	$ 7,300.00
2	4	Reguladores de flujo mang 8mm rosca 1/4	5 dias	$ 175.00	$ 700.00
			5 dias		$ -
3	1	Valvula 5/2, pilotaje neumatico	5 dias	$ 2,350.00	$ 2,350.00
4	5	conector recta mang 8mm rosca 3/8	5 dias	$ 42.00	$ 210.00
5	2	silenciador 3/8	5 dias	$ 85.00	$ 170.00
					$ -
6	1	Pedal neumatico	5 dias	$ 820.00	$ 820.00
7	2	conector recta mang 8mm - rosca 1/4		$ 46.00	$ 92.00
8	5	T neumatica 8mm	5 dias	$ 62.00	$ 310.00
			5 dias		$ -
9	1	Unidad FRL 3/8		$ 1,867.00	$ 1,867.00
10	1	valvula de corte manual	5 dias	$ 465.00	$ 465.00
11	1	espaciador	5 dias	$ 76.00	$ 76.00
12	1	Silenciador para valvula 1/4	5 dias	$ 85.00	$ 85.00
13	20	Manguera 8mm (20 metros)	5 dias	$ 45.00	$ 900.00

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Proceso de fabricación.

El proceso de fabricación de la máquina semiautomática para el corte de embutidos en cubos uniformes se llevó a cabo siguiendo una secuencia estructurada de etapas, con el objetivo de garantizar la funcionalidad, resistencia mecánica y cumplimiento de las condiciones sanitarias requeridas en la industria alimentaria.
En una primera etapa, se realizó el corte de los perfiles estructurales de acero inoxidable conforme a las dimensiones establecidas en el diseño, correspondientes a la longitud, ancho y altura de la máquina. Para ello, se emplearon herramientas de corte que aseguran precisión dimensional y acabados adecuados en los extremos de los perfiles, permitiendo un correcto ensamble posterior.
Posteriormente, se procedió al ensamble de la estructura principal, utilizando procesos de soldadura adecuados para acero inoxidable de grado alimenticio. Este tipo de soldadura fue seleccionado con el fin de evitar la contaminación del material y garantizar superficies lisas, facilitando la limpieza y el cumplimiento de normativas sanitarias. Una vez ensamblado el bastidor, se verificaron la escuadra, la nivelación y la rigidez estructural del conjunto.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID083

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

En la siguiente fase, se llevó a cabo la instalación de los componentes mecánicos y neumáticos. Se montaron los cilindros neumáticos en la parte superior de la estructura, asegurando su correcta alineación para un desplazamiento lineal eficiente. Asimismo, se integraron las rejillas de corte con geometría cuadrática, las cuales fueron fijadas en la zona de salida del producto, garantizando su estabilidad durante la operación.
De manera paralela, se realizó la instalación del sistema neumático, incluyendo la colocación de la válvula direccional 5/2, el pedal neumático de accionamiento, la unidad de mantenimiento (FRL), la válvula de corte manual, así como las conexiones, mangueras y accesorios previamente definidos en el diseño. Se verificó la correcta distribución de las líneas de aire, evitando fugas y asegurando un flujo adecuado hacia los actuadores.
Para la fijación de los distintos componentes, se empleó tornillería de acero inoxidable de grado alimenticio, lo cual contribuye a mantener las condiciones higiénicas del equipo y a evitar procesos de corrosión. Finalmente, se realizaron pruebas de funcionamiento del sistema neumático y del mecanismo de corte, evaluando la correcta operación de los cilindros, la respuesta del sistema de control y la uniformidad del producto obtenido.
En la Figura 6 se muestra la máquina construida durante su etapa de pruebas, donde se observa su funcionamiento en condiciones reales de operación.

Figura 6
Construcción de máquina.



.

3.2 Pruebas de funcionamiento.

Con el objetivo de validar el desempeño de la máquina semiautomática, se llevó a cabo una serie de pruebas de funcionamiento en condiciones reales de operación, utilizando embutido tipo salchicha como materia prima. Estas pruebas permitieron evaluar la eficiencia del sistema neumático, la precisión del mecanismo de corte y la uniformidad del producto obtenido.

Durante la operación, se verificó el correcto accionamiento de los cilindros neumáticos mediante el pedal de control, observándose un desplazamiento uniforme y continuo del producto hacia la rejilla de corte. El sistema respondió de manera adecuada, sin presentar fallas mecánicas ni pérdidas significativas de presión en el circuito neumático.
Como resultado de las pruebas, se obtuvieron cubos de embutido con dimensiones aproximadas de 3 cm x 3 cm, en concordancia con el diseño de la rejilla cuadrática implementada. La geometría de las piezas resultantes fue homogénea, evidenciando una alta repetibilidad en el proceso de corte. Asimismo, se observó que el corte del embutido se realizó de manera limpia y precisa, sin deformaciones significativas ni desintegración del producto.
Adicionalmente, el flujo de salida del producto hacia la zona de recolección fue continuo, lo que demuestra la adecuada integración entre el sistema de empuje y el elemento de corte.
En la Figura 7 se presenta la evidencia del producto obtenido durante la prueba, donde se aprecia la uniformidad en el tamaño de los cubos generados.
En general, los resultados obtenidos pueden considerarse favorables, ya que la máquina cumple con el objetivo de generar cortes uniformes, optimizando el proceso y reduciendo la intervención manual. Esto valida la viabilidad del diseño propuesto como una alternativa eficiente para el procesamiento de embutidos en pequeñas y medianas unidades de producción.

Figura 7
Pruebas de funcionamiento.



3.3 Recomendaciones para la mejora en la máquina.

A partir del desarrollo, construcción y evaluación de la máquina semiautomática para el corte de embutidos, se identificaron diversas áreas de oportunidad que pueden ser consideradas en futuros trabajos con el fin de mejorar el desempeño, la funcionalidad y el alcance de la máquina.
En primer lugar, se recomienda la incorporación de un sistema de automatización electrónica, mediante el uso de controladores lógicos programables (PLC) o microcontroladores, que permita optimizar la secuencia de operación de los cilindros neumáticos. Esto facilitará la programación de ciclos automáticos, la reducción de la intervención del operario y la mejora en la repetibilidad del proceso.
Asimismo, sería conveniente integrar sensores de posición y finales de carrera, con el objetivo de monitorear en tiempo real el desplazamiento de los actuadores y garantizar un control más

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID083

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

preciso del sistema. Esto permitiría incrementar la seguridad operativa y evitar posibles fallas mecánicas derivadas de desajustes en el recorrido de los cilindros.
Otra mejora potencial consiste en el diseño de un sistema de alimentación continua del producto, que permita automatizar la entrada de los embutidos hacia la zona de corte. Esto contribuiría a incrementar la capacidad de producción y reducir los tiempos muertos entre ciclos de operación.

En términos de diseño mecánico, se sugiere explorar la posibilidad de implementar rejillas de corte intercambiables, que permitan variar las dimensiones del producto final según los requerimientos del usuario. De esta manera, la máquina podría adaptarse a diferentes aplicaciones dentro de la industria alimentaria, aumentando su versatilidad.
También se recomienda realizar un análisis estructural detallado, mediante herramientas de simulación como el método de elementos finitos (FEM), con el fin de optimizar el diseño de la estructura y reducir el peso del equipo sin comprometer su resistencia mecánica.
Desde el punto de vista sanitario, se propone mejorar el diseño para facilitar aún más la limpieza, mediante la incorporación de superficies desmontables o sistemas de desmontaje rápido, lo cual es fundamental para cumplir con normativas de inocuidad alimentaria.

Finalmente, se sugiere llevar a cabo pruebas de desempeño a mayor escala, evaluando variables como la productividad, el consumo de aire comprimido, el desgaste de componentes y la durabilidad del sistema en condiciones reales de operación prolongada. Estos estudios permitirían validar la viabilidad del equipo en entornos industriales y fortalecer su potencial de implementación comercial.

La máquina de embutidos construida permitió integrar de manera interdisciplinaria conocimientos de diseño mecánico, sistemas neumáticos y principios de manufactura, evidenciando la importancia de un enfoque sistémico en la solución de problemas industriales.
A lo largo del proyecto, se identificó que la correcta interacción entre los distintos subsistemas (estructura mecánica, sistema de corte y control neumático) es determinante para alcanzar un desempeño eficiente y seguro.

Desde el punto de vista mecánico, el diseño estructural de la máquina demostró ser un factor clave para garantizar la estabilidad durante la operación. La selección de materiales, particularmente el uso de acero inoxidable en las partes en contacto con el producto, no solo responde a criterios de resistencia mecánica, sino también a normativas de higiene en la industria alimentaria. No obstante, durante el desarrollo se identificó que la distribución de esfuerzos y la rigidez estructural pueden optimizarse aún más para minimizar vibraciones y mejorar la precisión del corte.

En cuanto al sistema neumático, su implementación resultó adecuada para lograr movimientos lineales controlados con relativa simplicidad y bajo costo. Sin embargo, se observó que el desempeño del sistema depende en gran medida de variables externas como la calidad del aire comprimido y la correcta regulación del flujo. Esto pone de manifiesto la necesidad de considerar no solo el diseño del sistema, sino también las condiciones reales de operación y mantenimiento.
Un aspecto relevante del proyecto fue la problemática inicial relacionada con el comportamiento de la mezcla durante el proceso, donde se detectó que el diseño preliminar tendía a proyectar el material hacia arriba, afectando la eficiencia y limpieza del proceso. Este hallazgo permitió replantear el diseño hacia una configuración que mantuviera la mezcla contenida, lo que evidencia la importancia de la experimentación y validación en etapas tempranas del desarrollo.

Asimismo, el sistema de accionamiento mediante pedal neumático facilitó la operación manual, aunque limitó el grado de automatización del proceso. En este sentido, se reconoce como área de oportunidad la incorporación de sistemas de control automatizados (por ejemplo, mediante PLC), que permitan mejorar la repetibilidad, reducir la intervención del operario y aumentar la seguridad operativa.

Desde una perspectiva económica y de aplicabilidad, el proyecto demuestra que es posible desarrollar soluciones funcionales con costos relativamente accesibles, utilizando componentes comerciales y técnicas de manufactura convencionales. No obstante, la escalabilidad del sistema y su implementación en entornos industriales reales requerirían un análisis más profundo en términos de normativas, eficiencia energética y productividad.
Esta investigación pone en evidencia que el diseño de maquinaria para la industria alimentaria no solo implica resolver aspectos técnicos, sino también considerar factores como la higiene, la seguridad, la ergonomía y la facilidad de mantenimiento. En conjunto, los resultados obtenidos validan la viabilidad del prototipo desarrollado, al tiempo que abren la puerta a futuras mejoras y líneas de investigación orientadas a la optimización y automatización del sistema.

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo de la máquina permitió demostrar la viabilidad de integrar sistemas mecánicos y neumáticos en una solución accesible para el sector alimentario, particularmente en pequeñas y medianas unidades de producción. A partir del diseño, construcción y pruebas realizadas, se comprobó que es posible mejorar significativamente la eficiencia del proceso de corte mediante la automatización parcial del mismo.
El uso de materiales de acero inoxidable de grado alimenticio y componentes neumáticos adecuados garantizó no solo la resistencia mecánica del equipo, sino también el cumplimiento de condiciones higiénicas requeridas en la industria. Asimismo, el diseño estructural proporcionó estabilidad durante la operación, mientras que el sistema neumático permitió un accionamiento controlado, seguro y repetible.

Los resultados obtenidos durante las pruebas de funcionamiento evidenciaron que la máquina es capaz de generar cubos uniformes de aproximadamente 3 cm x 3 cm, cumpliendo con el objetivo planteado. El corte del embutido se realizó de manera precisa y continua, sin deformaciones significativas, lo que valida el correcto funcionamiento del mecanismo de corte y la adecuada sincronización de los actuadores neumáticos.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID083

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Adicionalmente, se logró reducir la dependencia del trabajo manual, disminuyendo el esfuerzo físico del operario y mejorando las condiciones de seguridad durante la operación. Esto representa una ventaja importante frente a los métodos tradicionales de corte, contribuyendo a la estandarización del producto y a la optimización del tiempo de procesamiento.

La máquina desarrollada constituye una alternativa tecnológica eficiente, funcional y económicamente viable, con potencial de implementación en la industria alimentaria local. Como trabajo futuro, se recomienda incorporar sistemas de automatización más avanzados, como control electrónico o sensores, que permitan optimizar aún más el proceso y aumentar la productividad del equipo.

V. AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su más sincero agradecimiento al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por su compromiso constante con el fortalecimiento de la educación superior tecnológica, así como por promover el desarrollo de la investigación científica y la innovación en el ámbito de la ingeniería. Su respaldo institucional ha sido fundamental para la generación de proyectos que contribuyen al desarrollo tecnológico y a la solución de problemáticas reales en el sector productivo.

De igual manera, se reconoce y agradece al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por las facilidades otorgadas para la realización del presente proyecto, incluyendo el acceso a infraestructura, recursos materiales y apoyo académico. La disposición de la institución para fomentar espacios de aprendizaje práctico y aplicado ha sido clave en la consolidación de este trabajo.

Asimismo, se extiende un agradecimiento a los docentes, investigadores y colaboradores que, directa o indirectamente, participaron en el desarrollo del proyecto, aportando sus conocimientos, experiencia y orientación a lo largo de las distintas etapas del mismo. Su acompañamiento fue esencial para el logro de los objetivos planteados.

Los trabajos colaborativos como el aquí presentado ponen de manifiesto la importancia de la vinculación efectiva entre la academia, las instituciones educativas y el sector productivo. Esta sinergia no solo fortalece la formación integral de los estudiantes y docentes, sino que también impulsa la generación de soluciones innovadoras con impacto real en la industria, promoviendo así el desarrollo económico y tecnológico de la región.

VI. REFERENCIAS

Barbosa-Cánovas, G. V., Ortega-Rivas, E., Juliano, P., & Yan, H. (2005). *Food powders: Physical properties, processing, and functionality*. Springer.

Bolton, W. (2015). *Pneumatic and hydraulic systems* (2nd ed.). Elsevier.

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2020). *Shigley's mechanical engineering design* (11th ed.). McGraw-Hill.

Fellows, P. J. (2017). *Food processing technology: Principles and practice* (4th ed.). Woodhead Publishing.

Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing engineering and technology* (7th ed.). Pearson.

Parr, A. (2011). *Hydraulics and pneumatics: A technician's and engineer's guide* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.

Rahman, M. S. (2009). *Food properties handbook* (2nd ed.). CRC Press.

Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2014). *Introduction to food engineering* (5th ed.). Academic Press.

Smith, W. F., & Hashemi, J. (2010). *Foundations of materials science and engineering* (5th ed.). McGraw-Hill.

Totten, G. E. (Ed.). (2006). *Steel heat treatment: Metallurgy and technologies*. CRC Press.

Ashby, M. F. (2011). Materials selection in mechanical design (4th ed.). Butterworth-Heinemann.

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). Thermodynamics: An engineering approach (9th ed.). McGraw-Hill.

Çengel, Y. A., & Turner, R. H. (2012). Fundamentals of thermal-fluid sciences (4th ed.). McGraw-Hill.

Groover, M. P. (2020). Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems (7th ed.). Wiley.

Kutz, M. (Ed.). (2011). Mechanical engineers' handbook (4th ed.). Wiley.

Mott, R. L. (2013). Applied fluid mechanics (7th ed.). Pearson.

Norton, R. L. (2020). Design of machinery: An introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines (6th ed.). McGraw-Hill.

Owen, J., & Croft, E. (2015). Industrial pneumatics handbook. McGraw-Hill.

Rao, S. S. (2011). Mechanical vibrations (5th ed.). Pearson.

Sharma, S. K., Mulvaney, S. J., & Rizvi, S. S. H. (2003). Food process engineering: Theory and laboratory experiments. Wiley.

Singh, J., & Cadwallader, K. R. (2016). Food processing: Principles and applications (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

Toledo, R. T. (2007). Fundamentals of food process engineering (3rd ed.). Springer.

Wakil, S. D. (2014). Processes and design for manufacturing (4th ed.). CRC Press.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción.
1	Conceptualización [Conceptualization]	Efrain Vaquera González
2	Curación de datos [Data curation]	Efrain Vaquera González
3	Análisis formal [Formal analysis]	Efrain Vaquera González
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Efrain Vaquera González
5	Investigación [Investigation]	Efrain Vaquera González
6	Methodología [Methodology]	Efrain Vaquera González
7	Administración del proyecto [Project administration]	Efrain Vaquera González
8	Recursos [Resources]	Efrain Vaquera González
9	Software [Software]	Efrain Vaquera González
10	Supervision [Supervision]	Efrain Vaquera González
11	Validación [Validation]	Efrain Vaquera González
12	Visualización [Visualization]	Efrain Vaquera González
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Efrain Vaquera González
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Efrain Vaquera González

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID083

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Claridad Vocacional y Propósito Universitario en Estudiantes de una Universidad en la Laguna

Career Clarity and Academic Purpose Among Students at a University in the Laguna Region, Mexico

Armendáriz-López S.[1]; Chairez-Fernández L.F. [2]; Regalado-Ríos M.G.[3]; Caldera-Rodríguez O.I.[4]; Torres-Camarillo G.[5]

Datos de Adscripción:

1 Armendáriz López, Saúl
Centro Universitario Trilingüe CUT Laguna. Gómez Palacio, Durango. México.
saularme84@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6107-4241

2 Chairez Fernández, Luis Felipe
Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
Tecnológico Nacional de México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
luis.cf@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4963-3216

3 Regalado Ríos, María Guadalupe
Centro Universitario Trilingüe CUT Laguna. Gómez Palacio, Durango. México.
regalado71084@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5144-4231

4 Caldera Rodríguez, Omar Israel
Centro Universitario Trilingüe CUT Laguna. Gómez Palacio, Durango. México.
omarcaldera0617@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0134-9632

5 Torres Camarillo, Gabriela
Centro Universitario Trilingüe CUT Laguna. Gómez Palacio, Durango. México.
gabrielatorrescamarillo@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4842-2081

Resumen - El objetivo del estudio fue analizar la relación entre claridad vocacional y propósito universitario en estudiantes del CUT Laguna, Campus Laguna, ubicado en Gómez Palacio, Durango, México. Se desarrolló una investigación no experimental, transversal, descriptivo-correlacional y de enfoque mixto, con una muestra de 228 estudiantes universitarios seleccionados mediante muestreo no probabilístico por conveniencia. Se aplicó un cuestionario tipo Likert de 15 ítems, organizado en dos dimensiones: claridad vocacional y propósito universitario, complementado con tres preguntas abiertas. La consistencia interna fue adecuada: alfa de Cronbach de .807 para claridad vocacional, .884 para propósito universitario y .894 para la escala total. El análisis factorial preliminar mostró KMO = .922, Bartlett $\chi^2(105) = 1794.52$, $p < .001$, y dos factores que explicaron aproximadamente el 57.5% de la varianza. Se observó una correlación positiva significativa entre claridad vocacional y propósito universitario, $r = .563$, $p < .001$, IC 95% [.467, .645]. La tipificación semántica mostró predominio de motivos vocacionales de elección de carrera (53.5%), propósito profesional/laboral (39.5%) y demanda de más información para elegir carrera (28.1%). Se concluye que la claridad vocacional se asocia significativamente con el propósito universitario; sin embargo, el instrumento debe interpretarse como evidencia psicométrica preliminar y no como validación definitiva.

Palabras Clave: Claridad Vocacional, Educación Universitaria, Estudiantes Universitarios, Propósito Universitario, Vocación.

Abstract - The aim of this study was to analyze the relationship between vocational clarity and university purpose among students from CUT Laguna, Campus Laguna, located in Gómez Palacio, Durango, Mexico. A non-experimental, cross-sectional, descriptive-correlational, mixed-method design was used with 228 university students selected through non-probabilistic convenience sampling. A 15-item Likert-type questionnaire was administered, organized into two dimensions: vocational clarity and university purpose, complemented by three open-ended questions. Internal consistency was adequate: Cronbach's alpha was .807 for vocational clarity, .884 for university purpose, and .894 for the total scale. Preliminary factor analysis showed KMO = .922, Bartlett's $\chi^2(105) = 1794.52$, $p < .001$, and two factors explaining approximately 57.5% of the variance. A positive significant correlation was found between vocational clarity and university purpose, $r = .563$, $p < .001$, 95% CI [.467, .645]. Semantic coding showed predominance of vocational career-choice motives (53.5%), professional/work-oriented purpose (39.5%), and demand for more information in the career-choice process (28.1%). It is concluded that vocational clarity is significantly associated with university purpose; however, the instrument should be interpreted as preliminary psychometric evidence rather than definitive validation.

Keywords: Career Choice, University Education, University Purpose, University Students, Vocational Clarity.

I. INTRODUCCIÓN

La elección de una carrera universitaria concentra decisiones vinculadas con los intereses personales, las expectativas familiares, las condiciones económicas, las oportunidades laborales y la identidad profesional. Desde la psicología vocacional, por tanto, no se entiende como un acto aislado de inscripción, sino como una expresión del desarrollo del autoconcepto y de la proyección ocupacional del estudiante (Super, 1990).

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID085

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

En este estudio, la claridad vocacional se define como el grado en que el estudiante identifica sus intereses, mantiene seguridad respecto de la carrera elegida, anticipa un futuro profesional y reconoce congruencia entre su identidad y el campo formativo. Esta delimitación se relaciona con el modelo de Holland (1997), que destaca la correspondencia entre características personales y ambientes ocupacionales, y con la teoría de construcción de carrera de Savickas (2013), centrada en la elaboración narrativa de la identidad, la adaptación y el sentido vocacional.

El propósito universitario se delimitó como el significado personal, profesional y social que el estudiante atribuye al cursar una carrera y a incorporarla a su proyecto de vida. Desde la teoría de la autodeterminación, una motivación de mayor calidad se favorece cuando las necesidades de autonomía, competencia y vinculación están satisfechas (Deci & Ryan, 2000). De manera complementaria, la investigación sobre el propósito durante la adultez emergente lo relaciona con la dirección personal, el bienestar y el desarrollo positivo (Damon, 2008; Hill et al., 2016). La toma de decisiones vocacionales exige algo más que recibir información sobre una oferta académica. El modelo de Gati y Asher (2001) plantea una secuencia de preselección, exploración detallada y elección, útil para comprender decisiones realizadas sin suficiente contraste entre intereses, alternativas y expectativas. En esos casos, la carrera puede elegirse por disponibilidad, presión familiar, expectativas económicas o condiciones institucionales.

La investigación se efectuó en el CUT Laguna, Campus Laguna, institución privada situada en Gómez Palacio, Durango, México. Participaron estudiantes presenciales del turno matutino inscritos en Pedagogía, Psicología, Criminología y Criminalística, Arquitectura, Derecho e Ingeniería Industrial. Los resultados se interpretan dentro de este contexto institucional y no permiten inferencias sobre la totalidad de la población universitaria de la Comarca Lagunera.

El objetivo fue examinar la asociación entre claridad vocacional y propósito universitario, reunir evidencia psicométrica inicial sobre el instrumento aplicado y describir semánticamente las respuestas abiertas. La integración de ambos componentes permitió considerar tanto las puntuaciones obtenidas como los argumentos mediante los cuales los estudiantes explicaron su elección y señalaron necesidades de orientación vocacional.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Diseño Del Estudio

Se adoptó un diseño no experimental, transversal y descriptivo-correlacional, integrado en un enfoque mixto convergente. Las variables se observaron sin manipulación y fueron medidas en una sola aplicación. Los datos cuantitativos y las respuestas abiertas se procesaron de manera diferenciada y, posteriormente, se articularon para interpretar la relación entre claridad vocacional, propósito universitario y significados atribuidos por los participantes.

El componente cuantitativo comprendió estadísticos descriptivos, estimaciones de consistencia interna, análisis de correlación, exploración factorial y comparación por grupos conocidos. El componente cualitativo consistió en clasificar las respuestas abiertas mediante categorías nominales definidas en un manual de codificación semántica.

2.2 Participantes Y Contexto

La muestra estuvo conformada por 228 estudiantes universitarios del CUT Laguna, Campus Laguna. La edad promedio fue de 20.41 años (DE = 4.78), con un rango de 17 a 56 años. Participaron 178 mujeres, 49 hombres y 1 hombre trans. Las carreras representadas fueron Pedagogía (n = 117), Psicología (n = 43), Criminología y Criminalística (n = 26), Arquitectura (n = 19), Derecho (n = 13) e Ingeniería Industrial (n = 10). Asimismo, 123 estudiantes reportaron que la carrera cursada fue su primera opción y 105 indicaron que no lo fue; 109 señalaron haber recibido orientación vocacional previa y 119 indicaron no haberla recibido.

Tabla 1

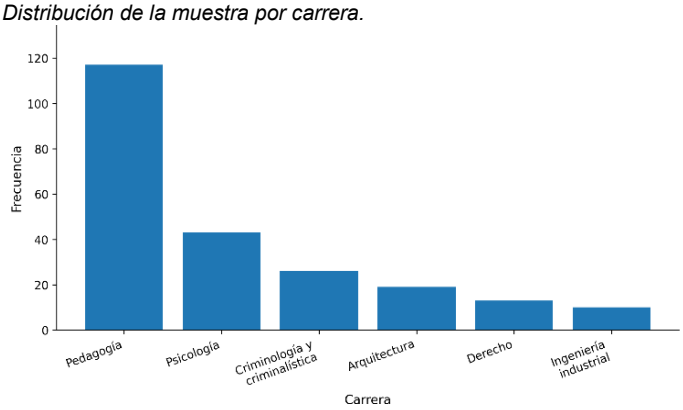
Características sociodemográficas y académicas de la muestra.

Variable	Categoría	n	Porcentaje aproximado
Sexo	Mujeres	178	78.1%
Sexo	Hombres	49	21.5%
Sexo	Hombre trans	1	0.4%
Carrera	Pedagogía	117	51.3%
Carrera	Psicología	43	18.9%
Carrera	Criminología y Criminalística	26	11.4%
Carrera	Arquitectura	19	8.3%
Carrera	Derecho	13	5.7%
Carrera	Ingeniería Industrial	10	4.4%
Primera opción	Sí	123	53.9%
Primera opción	No	105	46.1%
Orientación vocacional previa	Sí	109	47.8%
Orientación vocacional previa	No	119	52.2%

Nota. Los porcentajes fueron calculados sobre N = 228. La muestra fue no probabilística por conveniencia.

Figura 1

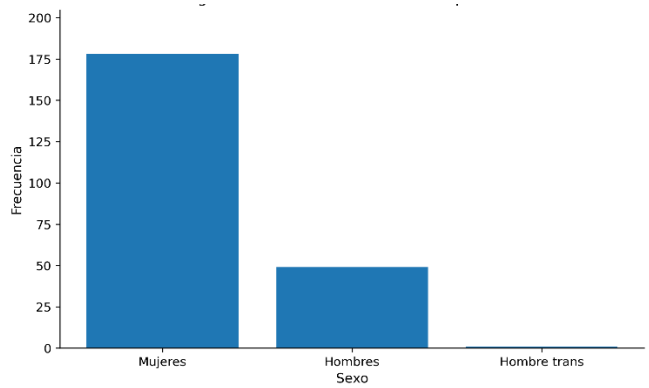
Distribución de la muestra por carrera.



Nota. N = 228 estudiantes universitarios.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 2
Distribución de la muestra por sexo.



Nota. N = 228 estudiantes universitarios.

2.3 Instrumento

El cuestionario se elaboró para estimar la claridad vocacional y el propósito atribuido a la formación universitaria. Su desarrollo se sustentó en una revisión conceptual de medidas relacionadas con autoeficacia para decidir una carrera, dificultades de elección, adaptabilidad vocacional y propósito de vida. La versión analizada forma parte de un proceso de validación y los resultados aquí presentados constituyen evidencia inicial.

La versión aplicada reunió 15 reactivos con cinco opciones de respuesta, distribuidos en claridad vocacional (6 ítems) y propósito universitario (9 ítems). Antes del análisis se invirtieron las puntuaciones de los reactivos: “A veces dudo si la carrera que elegí realmente es para mí” y “A veces siento que estudiar una carrera no tiene un propósito claro”.

El instrumento incorporó también tres preguntas abiertas sobre el motivo de elección de carrera, el sentido atribuido a estudiar una carrera universitaria y las modificaciones propuestas al proceso de elección. Las respuestas fueron organizadas mediante categorías semánticas previamente delimitadas. Conforme a los Standards for Educational and Psychological Testing, la validez debe sustentarse en evidencia acumulada sobre contenido, estructura interna, procesos de respuesta, relación con otras variables y consecuencias del uso de las puntuaciones (American Educational Research Association et al., 2014).

2.4 Procedimiento Ético Y De Aplicación

La coordinación académica del CUT Laguna autorizó la aplicación en el marco de la asignatura de Metodología de la Investigación I. Después de la autorización, el equipo acudió a los grupos participantes, explicó el propósito académico del cuestionario y proporcionó instrucciones uniformes para responderlo.

Se comunicó a los estudiantes que el cuestionario no contenía respuestas correctas o incorrectas, que debían contestar desde su propia percepción y que la información sería tratada confidencialmente y resguardada por el equipo y la institución. La aplicación fue presencial y se realizó en las aulas. Entre las mejoras previstas para futuros estudios se encuentran documentar por escrito el consentimiento informado, la participación voluntaria, el derecho a retirarse y la revisión por un comité institucional.

2.5 Tipificación Semántica Cualitativa

Las respuestas abiertas se examinaron mediante tipificación semántica. En P1 se distinguieron motivos vocacionales, altruistas, instrumentales, de influencia externa, de oportunidad, indefinidos y mixtos; la categoría mixta se asignó cuando coexistieron dos o más motivos explícitos. En P2 se clasificó el propósito como profesional/laboral, desarrollo personal, trascendencia/aporte social, mixto o indefinido. En P3 las propuestas se organizaron como orientación personalizada, más información, más práctica, mejora del sistema educativo, nada o indefinido.

Tabla 2
Manual sintético de codificación semántica de respuestas abiertas.

Pregunta	Código	Categoría	Definición operativa
P1	1	Vocacional	Interés interno, gusto, identidad personal o afinidad sostenida hacia la disciplina.
P1	2	Altruista	Deseo de ayudar, servir o impactar positivamente a otras personas.
P1	3	Instrumental	Beneficios prácticos como dinero, empleo, estabilidad o estatus.
P1	4	Influencia externa	Elección determinada o influida por familia, presión social o contexto.
P1	5	Oportunidad	Elección derivada de circunstancias disponibles más que de decisión clara.
P1	6	Indefinido	Ausencia de razón clara o incapacidad de explicar la elección.
P2	1	Profesional/laboral	La universidad es vista como medio para obtener empleo o estabilidad económica.
P2	2	Desarrollo personal	La carrera se percibe como medio de crecimiento individual, madurez o superación.
P2	3	Trascendencia/aporte social	La universidad se concibe como herramienta para contribuir a otros o a la sociedad.
P2	4	Mixto	Presencia explícita de dos o más dimensiones.
P2	5	Indefinido	No hay claridad sobre el sentido de estudiar una carrera.
P3	1	Orientación personalizada	Acompañamiento humano, diálogo, escucha y autoconocimiento.
P3	2	Más información	Datos, explicaciones, pruebas o claridad sobre carreras.
P3	3	Más práctica	Experiencias reales antes de elegir.
P3	4	Mejora del sistema	Crítica estructural al modelo educativo o proceso

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Pregunta	Código	Categoría	Definición operativa
		educativo	institucional.
P3	5	Nada	El estudiante considera que no se requiere modificar el proceso.
P3	6	Indefinido	No hay propuesta por falta de reflexión o respuesta vacía.
P1	7	Mixto	Respuesta que integra explícitamente dos o más motivos de elección de carrera, por ejemplo interés vocacional y deseo de ayudar.

Nota. Los códigos son identificadores nominales; no deben analizarse como variables continuas ni correlacionarse directamente mediante Pearson.

2.6 Análisis Estadístico

Se obtuvieron medidas descriptivas de las puntuaciones de claridad vocacional y propósito universitario. La consistencia interna se estimó con el alfa de Cronbach, entendido como un indicador de homogeneidad entre reactivos y no como evidencia suficiente de validez (Cronbach, 1951). Para investigaciones posteriores se prevé complementar este resultado con omega de McDonald, alfa ordinal y estabilidad temporal (Dunn et al., 2014; Tavakol & Dennick, 2011).

La estructura interna se examinó de forma preliminar mediante el índice Kaiser-Meyer-Olkin, la prueba de esfericidad de Bartlett y análisis paralelo. El KMO informa sobre la adecuación de los datos para el análisis factorial (Kaiser, 1974), mientras que Bartlett contrasta si la matriz de correlaciones contiene asociaciones suficientes para su factorización (Bartlett, 1950). La cantidad de factores se decidió mediante análisis paralelo, de acuerdo con Horn (1965) y con las recomendaciones metodológicas de Fabrigar et al. (1999).

La asociación entre las puntuaciones globales se estimó mediante el coeficiente de Pearson y su intervalo de confianza del 95%. Como evidencia por grupos conocidos, se comparó la claridad vocacional entre quienes cursaban su primera opción y quienes no. Las categorías cualitativas se trataron como variables nominales; por ello, se utilizaron para frecuencias y análisis de asociación y no como puntuaciones continuas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

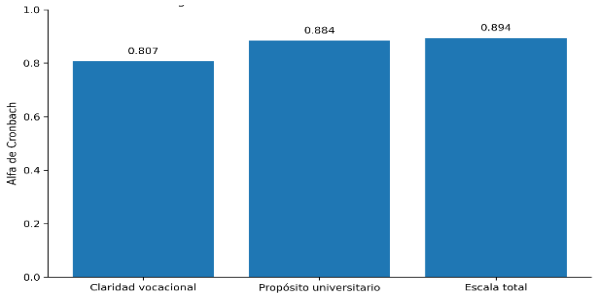
3.1 Consistencia Interna Y Evidencia Psicométrica Preliminar

El instrumento mostró consistencia interna adecuada. La escala de claridad vocacional obtuvo α = .807, la escala de propósito universitario obtuvo α = .884 y la escala total alcanzó α = .894. Estos valores sugieren coherencia interna suficiente para investigación preliminar.

Tabla 3
Confiabilidad interna del instrumento.

Escala	Ítems	Alfa de Cronbach	Interpretación
Claridad vocacional	6	.807	Buena
Propósito universitario	9	.884	Buena-alta
Escala total	15	.894	Alta

Figura 3
Confiabilidad interna del instrumento.



Dos ítems redactados en sentido negativo presentaron el menor rendimiento psicométrico. En claridad vocacional, el ítem “A veces dudo si la carrera que elegí realmente es para mí” obtuvo correlación ítem-total corregida de r = .254; si se elimina, el alfa aumenta de .807 a .857. En el propósito universitario, el ítem “A veces siento que estudiar una carrera no tiene un propósito claro” obtuvo r = .195; si se elimina, el alfa aumenta de .884 a .913. Este patrón sugiere posible ruido metodológico por redacción inversa o dificultad de comprensión, por lo que se recomienda reformular ambos ítems en futuras versiones.

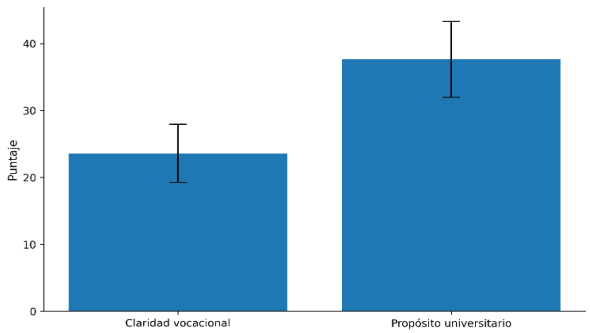
3.2 Estadísticos Descriptivos

La claridad vocacional presentó M = 23.59, DE = 4.33, con rango observado de 7 a 30. El propósito universitario presentó M = 37.63, DE = 5.66, con rango observado de 9 a 45. En términos descriptivos, ambos constructos se ubicaron en niveles medio-altos; sin embargo, los valores mínimos muestran que existe un grupo de estudiantes con menor claridad y menor propósito, lo que justifica análisis posteriores por perfiles y categorías semánticas.

Tabla 4
Estadísticos descriptivos de las puntuaciones globales.

Variable	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Claridad vocacional	23.59	4.33	7	30
Propósito universitario	37.63	5.66	9	45

Figura 4
Medias y desviaciones estándar de las escalas.



Nota. La claridad vocacional obtuvo M = 23.59, DE = 4.33; el propósito universitario obtuvo M = 37.63, DE = 5.66.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID085

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

3.3 Análisis Factorial Preliminar

La adecuación muestral para análisis factorial fue excelente, KMO = 0.922. La prueba de esfericidad de Bartlett fue significativa, $\chi^2(105) = 1794.52$, $p < .001$, lo que indica que la matriz de correlaciones fue apta para análisis factorial. El análisis paralelo sugirió una estructura de dos factores, coherente con las dimensiones teóricas de claridad vocacional y propósito universitario. Los dos factores explican aproximadamente el 57.5% de la varianza. Esta evidencia es favorable, pero debe interpretarse como exploratoria; para afirmar la validez estructural se requiere un análisis factorial confirmatorio con una muestra independiente.

Tabla 5
Resultados del análisis factorial preliminar.

Indicador	Resultado	Interpretación
KMO	.922	Adecuación muestral excelente
Bartlett	$\chi^2(105) = 1794.52$, $p < .001$	Matriz apta para análisis factorial
Análisis paralelo	2 factores	Solución congruente con el modelo teórico
Varianza explicada	57.5% aproximadamente	Evidencia exploratoria favorable

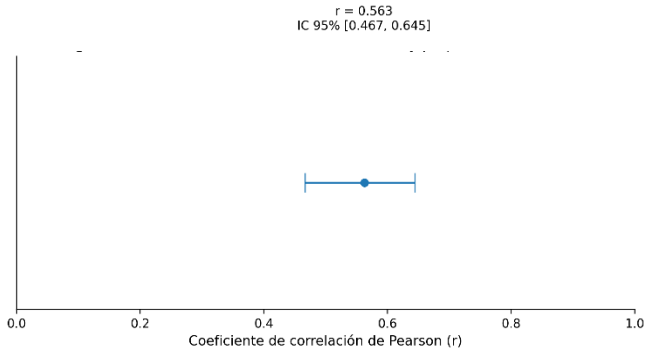
3.4 Relación Entre Claridad Vocacional Y Propósito Universitario

Se encontró una correlación positiva, moderada-alta y estadísticamente significativa entre claridad vocacional y propósito universitario, $r = .563$, $p < .001$, IC 95% [.467, .645]. Este resultado permite rechazar la hipótesis nula principal y sostiene que los estudiantes con mayor claridad vocacional tienden a atribuir mayor sentido a su formación universitaria. No obstante, el diseño transversal impide establecer causalidad.

Tabla 6
Correlación entre claridad vocacional y propósito universitario.

Variables	r de Pearson	p	IC 95%
Claridad vocacional - Propósito universitario	.563	< .001	[.467, .645]

Figura 5
Estimación de la correlación entre claridad vocacional y propósito universitario.



Nota. La correlación de Pearson fue positiva, moderada-alta y estadísticamente significativa, $r = .563$, IC 95% [.467, .645], $p < .001$.

Este resultado es coherente con la teoría de la autodeterminación, en la medida en que una elección más autónoma y congruente puede asociarse con mayor sentido subjetivo de la experiencia educativa (Deci & Ryan, 2000). También coincide con la literatura sobre propósito en la adultez emergente, que vincula el propósito con dirección, identidad y desarrollo positivo (Hill et al., 2016).

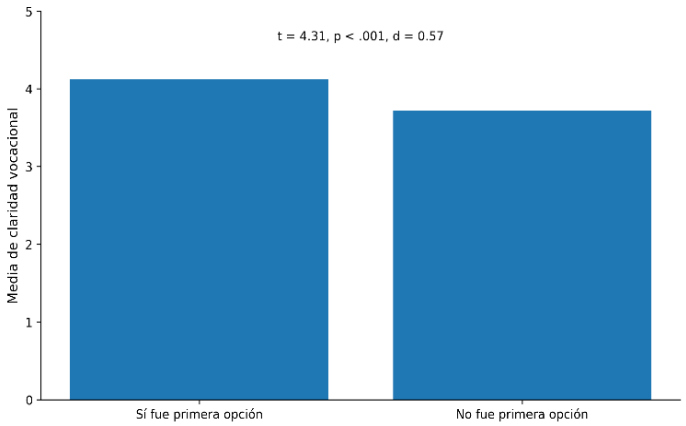
3.5 Validez Por Grupos Conocidos

El instrumento diferenció entre estudiantes que reportaron que su carrera fue primera opción y quienes indicaron que no lo fue. Quienes estudiaban su primera opción obtuvieron mayor claridad vocacional (M = 4.12) que quienes no estudiaban su primera opción (M = 3.72). La diferencia fue estadísticamente significativa, $t = 4.31$, $p < .001$, $d = .57$. Este resultado aporta evidencia preliminar de validez por grupos conocidos, dado que es teóricamente esperable que estudiar la primera opción se asocie con mayor claridad vocacional.

Tabla 7
Comparación de claridad vocacional según la primera opción de carrera.

Grupo	Media de claridad vocacional	Resultado inferencial
Sí fue primera opción	4.12	$t = 4.31$, $p < .001$, $d = .57$
No fue primera opción	3.72	Diferencia significativa

Figura 6
Claridad vocacional según la primera opción de carrera.



Nota. Los estudiantes cuya carrera fue su primera opción mostraron mayor claridad vocacional que quienes indicaron que no lo fue, $t = 4.31$, $p < .001$, $d = .57$.

No se observaron diferencias estadísticamente significativas claras entre estudiantes que recibieron orientación vocacional previa y quienes no la recibieron. Este resultado no debe interpretarse como evidencia de inutilidad de la orientación vocacional; más bien, sugiere que la variable dicotómica sí/no no mide calidad, duración, profundidad ni metodología de la orientación recibida.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID085

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

3.6 Análisis Semántico De Respuestas Abiertas

La tipificación semántica permitió convertir las respuestas abiertas en variables nominales interpretables. Este procedimiento no sustituye el análisis psicométrico, sino que lo complementa al describir la fuente subjetiva de la elección de carrera, el sentido atribuido a estudiar una carrera universitaria y las necesidades percibidas en el proceso de orientación vocacional.

En la pregunta 1, referida al motivo de elección de carrera, predominó la categoría vocacional (n = 122, 53.5%), seguida de la categoría altruista (n = 35, 15.4%) y de la elección por oportunidad (n = 26, 11.4%). Las categorías de influencia externa (n = 16, 7.0%), instrumental (n = 9, 3.9%) e indefinida (n = 5, 2.2%) tuvieron menor presencia. Además, se identificó una categoría mixta (n = 15, 6.6%) para respuestas que integraban más de una motivación explícita. En conjunto, las respuestas asociadas con oportunidad, influencia externa, instrumentalidad e indefinición representaron 24.6% de la muestra, lo cual sugiere que aproximadamente uno de cada cuatro estudiantes eligió la carrera desde una base menos autónoma o menos elaborada.

En la pregunta 2, relacionada con el propósito de estudiar una carrera universitaria, predominó la categoría profesional/laboral (n = 90, 39.5%), seguida de desarrollo personal (n = 70, 30.7%) y propósito mixto (n = 58, 25.4%). Las categorías de trascendencia/aporte social (n = 7, 3.1%) e indefinido (n = 3, 1.3%) fueron menos frecuentes. Este patrón indica que el sentido atribuido a la educación universitaria se organiza principalmente alrededor de la proyección laboral y del crecimiento personal, mientras que el aporte social aparece con menor presencia explícita.

En la pregunta 3, referida a propuestas para mejorar el proceso de elección de carrera, la categoría más frecuente fue más información (n = 64, 28.1%), seguida de nada (n = 45, 19.7%), orientación personalizada (n = 41, 18.0%), indefinido (n = 33, 14.5%), mejora del sistema educativo (n = 29, 12.7%) y más práctica (n = 16, 7.0%). Estos hallazgos sugieren que una proporción relevante de estudiantes percibe insuficiencia informativa y necesidad de acompañamiento en el proceso de elección vocacional.

Tabla 8

Frecuencias y porcentajes de la tipificación semántica de las respuestas abiertas.

Pregunta	Categoría semántica	n	%
P1	Vocacional	122	53.5
P1	Altruista	35	15.4
P1	Oportunidad	26	11.4
P1	Influencia externa	16	7.0
P1	Mixto	15	6.6
P1	Instrumental	9	3.9
P1	Indefinido	5	2.2
P2	Profesional/laboral	90	39.5
P2	Desarrollo personal	70	30.7
P2	Mixto	58	25.4
P2	Trascendencia/aporte social	7	3.1
P2	Indefinido	3	1.3
P3	Más información	64	28.1
P3	Nada	45	19.7
P3	Orientación personalizada	41	18.0
P3	Indefinido	33	14.5
P3	Mejora del sistema educativo	29	12.7
P3	Más práctica	16	7.0

Nota. Los porcentajes fueron calculados sobre N = 228. Los códigos de las categorías son nominales y no deben interpretarse como valores ordinales ni continuos.

La lectura integrada de las tres preguntas muestra que la mayoría de los estudiantes explica su elección por un motivo vocacional, pero atribuye a la universidad un sentido predominantemente profesional/laboral. Por tanto, vocación y propósito universitario no deben tratarse como constructos equivalentes: un estudiante puede elegir una carrera por gusto o afinidad, pero interpretar la formación universitaria principalmente como medio para obtener empleo o estabilidad económica.

Los resultados cualitativos son congruentes con el hallazgo cuantitativo central del estudio: la claridad vocacional se asoció positivamente y significativamente con el propósito universitario. La tipificación semántica aporta una explicación complementaria, al mostrar que la claridad no solo se expresa en puntajes, sino también en la forma discursiva mediante la cual el estudiante justifica su elección de carrera y construye el sentido de su formación.

Debido a que las categorías semánticas son variables nominales, no se realizaron correlaciones de Pearson con sus códigos numéricos. Para futuras fases analíticas se recomienda emplear pruebas de chi-cuadrada y V de Cramer para evaluar asociaciones entre categorías, así como ANOVA, Welch o Kruskal-Wallis para comparar puntajes de claridad vocacional y propósito universitario entre grupos semánticos. También se recomienda transformar las categorías en variables dummy si se desea incorporarlas a modelos de regresión.

3.7 Discusión General

Los hallazgos muestran que claridad vocacional y propósito universitario están relacionados, aunque representan dimensiones distintas. La magnitud de la correlación fue relevante, pero dejó una proporción sustancial de variación sin explicar. La integración cualitativa mostró que el predominio de motivos vocacionales no implica necesariamente un propósito universitario del mismo tipo, pues el sentido de estudiar se expresó con mayor frecuencia en términos profesionales y laborales. El propósito puede depender, además, de condiciones familiares, económicas, escolares y sociales, de la percepción del mercado de trabajo y de la calidad de la orientación recibida.

La evidencia psicométrica obtenida es favorable para una fase inicial: las escalas mostraron consistencia interna adecuada, la solución factorial exploratoria coincidió con la propuesta teórica y la comparación por primera opción presentó la diferencia esperada. Aun así, los reactivos invertidos redujeron su

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

contribución y la dimensión de propósito agrupó significados personales, laborales, sociales y de proyecto de vida. Esta amplitud requiere mayor delimitación y comprobación en muestras independientes.

En términos educativos, los resultados respaldan una orientación vocacional entendida como proceso y no como aplicación aislada de pruebas. La combinación de información pertinente, diálogo, autoconocimiento, contacto con escenarios profesionales y acompañamiento progresivo responde mejor a las necesidades expresadas por los estudiantes. Las demandas cualitativas se concentraron en mayor información, orientación personalizada y experiencias prácticas.

3.8 Limitaciones Y Mejoras Metodológicas

Con la finalidad de continuar y mejorar este estudio, se presentan en la Tabla 9 las principales limitaciones metodológicas identificadas y las acciones recomendadas para futuras fases de investigación.

Tabla 9

Limitaciones del estudio y acciones de mejora recomendadas.

Limitación	Implicación	Mejora recomendada
Muestreo por conveniencia	Limita la generalización de resultados	Ampliar muestra y usar muestreo estratificado por carrera y periodo
Ausencia de CFA	No permite afirmar validación estructural definitiva	Realizar análisis factorial confirmatorio con muestra independiente
Ítems invertidos débiles	Pueden introducir ruido metodológico	Reformular reactivos en sentido positivo y evaluar de nuevo
Sin Kappa de Cohen	Codificación cualitativa preliminar	Codificación por dos jueces y cálculo de acuerdo entre evaluadores
Orientación vocacional medida dicotómicamente	No evalúa calidad ni profundidad	Crear escala específica sobre experiencia de orientación vocacional
Sin validez convergente-discriminante	No se compara con instrumentos externos	Aplicar escalas validadas de autoeficacia vocacional, indecisión y propósito de vida

IV. CONCLUSIONES

El estudio encontró una relación positiva, moderada-alta y estadísticamente significativa entre claridad vocacional y propósito universitario en estudiantes del CUT Laguna. Esto indica que quienes presentan mayor definición sobre su elección profesional tienden a atribuir mayor sentido a su formación universitaria.

El instrumento mostró evidencia preliminar favorable de confiabilidad, estructura interna exploratoria y validez por grupos conocidos. Sin embargo, no debe presentarse como instrumento plenamente validado. La formulación correcta es que cuenta con evidencia psicométrica inicial favorable y requiere nuevos estudios de validez de contenido, análisis factorial confirmatorio, validez convergente-discriminante, estabilidad temporal e invarianza de medición.

La tipificación semántica permitió identificar que la elección de carrera estuvo sostenida principalmente por motivaciones vocacionales (53.5%), aunque también se observaron motivos altruistas, instrumentales, externos, de oportunidad, mixtos e indefinidos. Asimismo, el propósito de estudiar una carrera se formuló predominantemente desde una lógica profesional/laboral (39.5%), seguida por desarrollo personal (30.7%) y propósito mixto (25.4%). Esta clasificación aporta una lectura educativa relevante: no basta con saber si el estudiante eligió una carrera, también importa desde dónde la eligió y qué sentido le atribuye.

La recomendación principal para la práctica educativa es fortalecer los procesos de orientación vocacional en educación media superior y superior mediante programas de autoconocimiento, exploración de carreras, mentoría, experiencias prácticas y reflexión sobre el proyecto de vida. Los resultados cualitativos respaldan esta necesidad, ya que la propuesta más frecuente de mejora fue contar con más información (28.1%), seguida por orientación personalizada (18.0%). El reto institucional no consiste solo en informar sobre carreras, sino en acompañar decisiones vocacionales con mayor profundidad.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, Campus Lerdo, y a la Subdirección de Posgrado e Investigación por el acompañamiento académico. Asimismo, reconocen al CUT Laguna, Campus Laguna, por autorizar la aplicación, a su coordinación académica y a los estudiantes que participaron en el estudio.

VI. REFERENCIAS

American Educational Research Association, American Psychological Association, & National Council on Measurement in Education. (2014). *Standards for educational and psychological testing*. American Educational Research Association.

Bartlett, M. S. (1950). Tests of significance in factor analysis. *British Journal of Statistical Psychology, 3*(2), 77-85. https://doi.org/10.1111/j.2044-8317.1950.tb00285.x

Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology, 3*(2), 77-101. https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa

Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement, 20*(1), 37-46. https://doi.org/10.1177/001316446002000104

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika, 16*(3), 297-334. https://doi.org/10.1007/BF02310555

Damon, W. (2008). *The path to purpose: How young people find their calling in life*. Free Press.

Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2000). The “what” and “why” of goal pursuits: Human needs and the self-determination of behavior. *Psychological Inquiry, 11*(4), 227-268. https://doi.org/10.1207/S15327965PLI1104_01

Dunn, T. J., Baguley, T., & Brunsden, V. (2014). From alpha to omega: A practical solution to the pervasive problem of internal consistency estimation. *British Journal of Psychology, 105*(3), 399-412. https://doi.org/10.1111/bjop.12046

Fabrigar, L. R., Wegener, D. T., MacCallum, R. C., & Strahan, E. J. (1999). Evaluating the use of exploratory factor analysis in psychological research. *Psychological Methods, 4*(3), 272-299. https://doi.org/10.1037/1082-989X.4.3.272

Gati, I., & Asher, I. (2001). Prescreening, in-depth exploration, and choice: From decision theory to career counseling practice. *The Career Development Quarterly, 50*(2), 140-157. https://doi.org/10.1002/j.2161-0045.2001.tb00979.x

Hill, P. L., Edmonds, G. W., Peterson, M., Luyckx, K., & Andrews, J. A. (2016). Purpose in life in emerging adulthood: Development and validation of a new brief measure. *The Journal of Positive Psychology, 11*(3), 237-245. https://doi.org/10.1080/17439760.2015.1048817

Holland, J. L. (1997). *Making vocational choices: A theory of vocational personalities and work environments* (3rd ed.). Psychological Assessment Resources.

Horn, J. L. (1965). A rationale and test for the number of factors in factor analysis. *Psychometrika, 30*(2), 179-185. https://doi.org/10.1007/BF02289447

Kaiser, H. F. (1974). An index of factorial simplicity. *Psychometrika, 39*(1), 31-36. https://doi.org/10.1007/BF02291575

Savickas, M. L. (2013). Career construction theory and practice. In S. D. Brown & R. W. Lent (Eds.), *Career development and counseling: Putting theory and research to work* (2nd ed., pp. 147-183). Wiley.

Super, D. E. (1990). A life-span, life-space approach to career development. In D. Brown & L. Brooks (Eds.), *Career choice and development* (2nd ed., pp. 197-261). Jossey-Bass.

Tavakol, M., & Dennick, R. (2011). Making sense of Cronbach’s alpha. *International Journal of Medical Education, 2*, 53-55. https://doi.org/10.5116/ijme.4dfb.8dfd

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización Conceptualization	Saúl Armendáriz López, María Guadalupe Regalado Ríos, Gabriela Torres Camarillo y Omar Israel Caldera Rodríguez.
2	Curación de datos Data curation	Luis Felipe Chairez Fernández
3	Análisis formal Formal analysis	Luis Felipe Chairez Fernández
4	Obtención de fondos Funding acquisition	Saúl Armendáriz López, María Guadalupe Regalado Ríos, Gabriela Torres Camarillo y Omar Israel Caldera Rodríguez.
5	Investigación Investigation	Saúl Armendáriz López, María Guadalupe Regalado Ríos, Gabriela Torres Camarillo y Omar Israel Caldera Rodríguez.
6	Methodología Methodology	Saúl Armendáriz López y Luis Felipe Chairez Fernández
7	Administración del proyecto Project administration	Saúl Armendáriz López
8	Recursos Resources	Saúl Armendáriz López, María Guadalupe Regalado Ríos, Gabriela Torres Camarillo y Omar Israel Caldera Rodríguez.
9	Software Software	Saúl Armendáriz López y Luis Felipe Chairez Fernández
10	Supervisión Supervision	Luis Felipe Chairez Fernández
11	Validación Validation	Luis Felipe Chairez Fernández
12	Visualización Visualization	Saúl Armendáriz López y Luis Felipe Chairez Fernández
13	Redacción - borrador original Writing – original draft	Saúl Armendáriz López, María Guadalupe Regalado Ríos, Gabriela Torres Camarillo y Omar Israel Caldera Rodríguez.
14	Redacción - revisión y edición Writing – review & editing	Luis Felipe Chairez Fernández

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID085

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Efecto de Lixiviado de Vermicompost Enriquecido con *Trichoderma Viride* en el Crecimiento del Tomate

Effect of Vermicompost Leachate Enriched with *Trichoderma Viride* on Tomato Growth

Velásquez-Chávez, T.E.[1]; Servín-Prieto, A.J.[2]✉; Hernández-López, M.[3]; Vásquez-Corral, M.H.[4]; Juárez-Hernández, J.M.[5]

Datos de Adscripción:

[1] Velásquez Chávez, Tania Elizabeth
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
tania.vc@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7788-1786

[2] ✉ Servín Prieto, Alan Joel
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
alan.sp@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5534-7875

[3] Hernández López, Mónica
TecNM: Instituto Tecnológico de Torreón. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
monicahlop@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6249-127X

[4] Vásquez Corral, Marcial Humberto
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
marcial.vc@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0722-0369

[5] Juárez Hernández, José María
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
jose.jh@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5790-651X

Resumen **- El cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) es de gran importancia económica en México; sin embargo, su producción enfrenta limitaciones asociadas al uso intensivo de agroquímicos y a la incidencia de patógenos del suelo. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del enriquecimiento del lixiviado de vermicompost con *Trichoderma viride* sobre el crecimiento y desarrollo de plántulas de tomate, como una alternativa sostenible en la agricultura. La metodología consistió en la inoculación del hongo en lixiviado previamente esterilizado y su aplicación en semillas de tomate bajo condiciones controladas. Posteriormente, las plántulas fueron establecidas en invernadero y evaluadas mediante parámetros fisiológicos y de crecimiento, incluyendo contenido de clorofila, peso fresco, peso seco y contenido de nitrógeno. Se compararon tres tratamientos: lixiviado con hongo (LH), lixiviado sin hongo (LS) y un control con agua (SA). Los resultados mostraron que el tratamiento LH presentó valores significativamente superiores en todas las variables evaluadas, destacando un mayor contenido de clorofila (0.7205 µg/mg), mayor biomasa fresca (0.6283 g), mayor peso seco (0.0613 g) y mayor contenido de nitrógeno (1.69%). El tratamiento LS mostró valores intermedios, mientras que el control (SA) presentó los valores más bajos. Estos hallazgos evidencian que la combinación de lixiviado de vermicompost con Trichoderma viride genera un efecto sinérgico que favorece la actividad fotosintética, la absorción de nutrientes y la acumulación de biomasa en plantas de tomate. Se concluye que este bioinsumo representa una alternativa viable para reducir el uso de agroquímicos y promover sistemas agrícolas más sostenibles.**

Palabras Clave**: Agricultura sostenible, Biofertilizantes, Crecimiento vegetal, Tomate, *Trichoderma viride***

Abstract **- Tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivation is of great economic importance in Mexico; however, its production faces limitations associated with the intensive use of agrochemicals and the incidence of soilborne pathogens. In this context, the present study aimed to evaluate the effect of enriching vermicompost leachate with *Trichoderma viride* on the growth and development of tomato seedlings, as a sustainable alternative in agriculture. The methodology consisted of inoculating the fungus into previously sterilized leachate and applying it to tomato seeds under controlled conditions. Subsequently, the seedlings were established in a greenhouse and evaluated using physiological and growth parameters, including chlorophyll content, fresh weight, dry weight, and nitrogen content. Three treatments were compared: leachate with fungus (LH), leachate without fungus (LS), and a control with water (SA). The results showed that the LH treatment exhibited significantly higher values in all evaluated variables, notably a higher chlorophyll content (0.7205 µg/mg), greater fresh biomass (0.6283 g), greater dry weight (0.0613 g), and higher nitrogen content (1.69%). The LS treatment showed intermediate values, while the control (SA) presented the lowest values. These findings demonstrate that the combination of vermicompost leachate with *Trichoderma viride* generates a synergistic effect that promotes photosynthetic activity, nutrient absorption, and biomass accumulation in tomato plants. It is concluded that this bio-input represents a viable alternative for reducing the use of agrochemicals and promoting more sustainable agricultural systems.**

Keywords**: Biofertilizers, Plant growth, Sustainable agriculture, Tomato, *Trichoderma viride***

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID087

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

I. INTRODUCCIÓN

La integración de enmiendas orgánicas e inoculantes microbianos ha surgido como una estrategia sostenible para mejorar la productividad de los cultivos y minimizar la dependencia de fertilizantes sintéticos. Específicamente, la combinación del lixiviado de vermicompost rico en nutrientes con la actividad biológica de *Trichoderma viride* ofrece un enfoque prometedor para optimizar el desarrollo fisiológico y bioquímico de las plantas (Ashour et al., 2023). Si bien el lixiviado de vermicompost proporciona una fuente concentrada de nutrientes esenciales derivados de residuos orgánicos mineralizados (Alabi et al., 2023), la colonización secundaria por *Trichoderma viride* mejora la tolerancia al estrés y promueve el crecimiento a través de complejos mecanismos de biocontrol (Metwally & Soliman, 2023). Investigaciones recientes indican que dicha fortificación microbiana puede aumentar significativamente la arquitectura de los brotes y la biomasa radicular, compensando eficazmente las deficiencias en la absorción de nutrientes en condiciones de crecimiento sub-óptimas (Azarmi et al., 2011). Además, se ha demostrado que la interacción sinérgica entre lixiviados bio-orgánicos e inoculantes fúngicos mejora la eficiencia fotosintética y la acumulación total de biomasa en diversos cultivos de solanáceas (Charoenrak et al., 2019; Sachdev et al., 2018). Sin embargo, la respuesta fisiológica específica de las plántulas de tomate a la aplicación combinada de lixiviado fortificado con *Trichoderma* sigue sin investigarse a fondo, en particular en lo que respecta a su potencial para mitigar las limitaciones de nutrientes en contextos ambientales fluctuantes (Arthur et al., 2012; Chinsamy et al., 2014).

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es un cultivo hortícola de gran importancia económica y global, especialmente en México, donde es originario y tiene una alta demanda internacional (Long, 1995; Razifard et al., 2020). Sin embargo, su cultivo intensivo a menudo depende de agroquímicos, lo que conlleva degradación ambiental, problemas de salud del suelo y riesgos para la salud humana(Aktar et al., 2009; Shaikh et al., 2025). Los cultivos de tomate son altamente susceptibles a diversas enfermedades bacterianas, fúngicas y virales, por lo que un manejo integrado y sostenible resulta crucial (Savary et al., 2019). En respuesta a los desafíos que plantean las prácticas agrícolas convencionales, existe un creciente interés en alternativas sostenibles que mejoren la productividad de los cultivos a la vez que preservan el equilibrio ecológico (Calvo et al., 2014; Foley et al., 2011).

Los microorganismos eficientes y los hongos del suelo, como los del género *Trichoderma*, se han revelado como prometedores agentes de control biológico y promotores del crecimiento vegetal (Guzmán-Guzmán et al., 2025; Martinez et al., 2023). *Trichoderma viride*, en particular, es reconocido por sus múltiples beneficios, que incluyen el antagonismo directo contra patógenos vegetales, la secreción de enzimas que degradan la pared celular y la estimulación de la producción de fitohormonas, lo que conduce a un mejor crecimiento de las plantas y una mayor absorción de nutrientes (Abdenaceur et al., 2022; Ren et al., 2025). Se ha demostrado que previene enfermedades como la marchitez por Fusarium en el tomate y mejora la tolerancia a diversos tipos de estrés (Hasna et al., 2025; Sehim et al., 2023). Paralelamente, el lixiviado de vermicompost, un biofertilizante líquido rico en nutrientes y microorganismos beneficiosos, ofrece un excelente complemento a los inoculantes microbianos (Jiang et al., 2023; Loera-Muro et al., 2021). Se ha demostrado que su aplicación favorece el desarrollo radicular, aumenta la resistencia a enfermedades y mejora la calidad de los frutos del tomate (Koskey et al., 2023). Por lo tanto, la combinación de *Trichoderma viride* y lixiviado de vermicompost representa un enfoque sinérgico para potenciar el vigor y la resiliencia de las plantas de forma sostenible. A pesar de los beneficios conocidos de estos componentes individuales, los efectos específicos del lixiviado de vermicompost enriquecido con Trichoderma viride sobre el crecimiento y las características fisiológicas del tomate requieren una mayor investigación.

Este estudio tuvo como objetivo enriquecer el lixiviado de vermicompost con Trichoderma viride y evaluar su impacto en la germinación de semillas y el posterior desarrollo de la planta de tomate, centrándose en parámetros físicos y químicos clave. Nuestra hipótesis fue que el lixiviado de vermicompost enriquecido promovería significativamente el crecimiento y el rendimiento fisiológico del tomate.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Identificación de Trichoderma aislado de suelos de la Comarca Lagunera

Para la identificación del hongo, se extrajo ADN genómico utilizando el método CTAB (Doyle y Doyle, 1990). Se utilizaron los cebadores universales ITS1 (5′-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3′) e ITS4 (5′-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3′) para abarcar el bloque estructural ITS1-5.8S-ITS2. Los productos de PCR se purificaron utilizando el kit Wizard® Genomic DNA Purification Kit (Promega) y posteriormente se enviaron a McLAB (San Francisco, CA, EE. UU.) para su secuenciación.

Las secuencias obtenidas se compararon mediante BLAST (NCBI) (http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi) para determinar la identidad taxonómica de la cepa (Jha et al., 2012; Weisburg et al., 1991).

2.2 Preparación del inóculo

El inóculo de *Trichoderma viride* se preparó inicialmente mediante el cultivo del hongo en placas de agar PDA (39 g L^{-1}) en cajas Petri. Tras 5–7 días de incubación a 30 °C para asegurar una esporulación óptima, se adicionaron 10 mL de agua destilada estéril suplementada con Tween 80® al 0.1% sobre la superficie de las colonias con micelio en crecimiento activo. La mezcla se homogeneiza con vortex durante 30 segundos, para de esta manera asegurar la dispersión uniforme de los conidios. Posteriormente, se realizaron diluciones seriales en agua estéril con Tween 80® al 0.1%, hasta alcanzar una dilución apropiada (10^{-3}) (Abreo et al., 2025).

La cuantificación y estandarización de los conidios se llevaron a cabo por triplicado mediante microscopía óptica utilizando una cámara de Neubauer de 0.1 mm de profundidad. Se contabilizaron los conidios presentes en los cinco cuadros secundarios del cuadrante central, determinando la concentración madre. Con base en esto, se inoculó el lixiviado de vermicompost previamente esterilizado, ajustando el volumen

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID087

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

para alcanzar una concentración de inoculación de al menos 1 × 10^6 conidios/mL (Bandara & Kang, 2024). Finalmente se establecieron tres tratamientos: lixiviado de vermicompost inoculado con *Trichoderma viride* (LH), lixiviado de vermicompost sin inoculación fúngica (LS) y un control con agua (SA).

2.3 Efectos sobre el crecimiento del tomate

Las semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*) se desinfectaron con una solución de hipoclorito de sodio al 10 % (v/v) durante 5 minutos y se enjuagaron con agua destilada estéril. Posteriormente, las semillas se inocularon durante 1 hora en las suspensiones correspondientes en vasos de precipitados de 50 mL. El diseño experimental fue completamente al azar con tres tratamientos (LH, LS, SA). La unidad experimental consistió en una cavidad individual de la charola de germinación. Se sembraron doce semillas por tratamiento, las cuales correspondieron a 12 repeticiones biológicas independientes, en las charolas que contenían turba estéril y se trasladaron a casas sombra comerciales.

Después de 20 días, las plántulas se cosecharon. Se evaluaron las 12 repeticiones biológicas por tratamiento, analizando un número total de 36 muestras para la longitud de la planta y de la raíz, los pesos fresco y seco, y el contenido total de clorofila determinado de acuerdo con Zhang & Huang, 2013.

Por otro lado, debido a la cantidad de tejido requerida, para la determinación de la concentración de nitrógeno mediante el método Kjeldahl, se seleccionaron 5 repeticiones biológicas por tratamiento, lo que representó un total de 15 muestras analizadas.

2.4 Análisis estadístico

Los diferentes parámetros de desarrollo vegetal (longitud de raíz, número de raíces laterales, peso de raíz y parte aérea) se analizaron bajo un diseño experimental completamente al azar. Se aplicó un análisis estadístico mediante ANOVA seguido de una prueba de comparación de medias de Tukey (HSD) con un nivel de significancia de P = 0.05. Los análisis se realizaron utilizando el software Prism versión 8.0.2.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

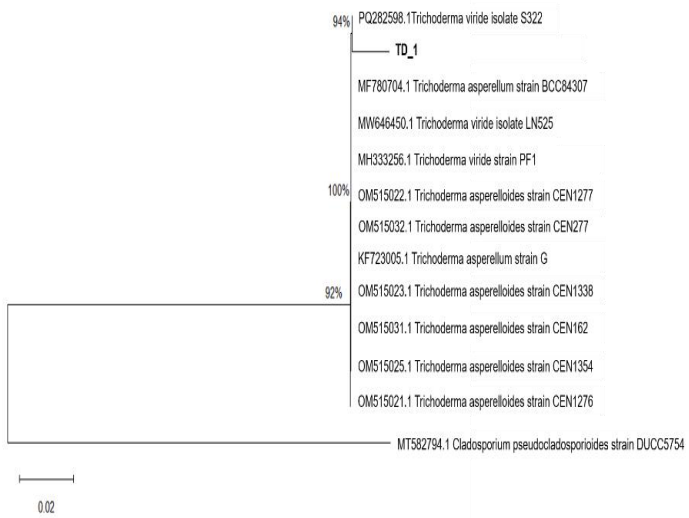
La secuencia de la región ITS obtenida se sometió a un análisis de homología mediante BLAST en la base de datos del NCBI para asignar la taxonomía al hongo. Los resultados mostraron que TD_1 presentó una homología del 97,92 % con *Trichoderma viride* (No. de acceso PQ282598.1).

Tabla 1
Identificación molecular por región ITS

ID cepa	Aislamiento	Taxon	Identidad	bp	NCBI Acceso
TD_1	*suelo*	*Trichoderma viride*	97.92 %	776	PQ282598.1

La secuencia de la región ITS se utilizó para crear el árbol de unión vecinal (Neighborg-Joining Tree). TD_1 se agrupó con *Trichoderma viride* isolate S322 (Figura 1).

Figura 1.
Neighbor-Joining Tree basados en la secuencia parcial ITS. El árbol muestra la relación de la cepa TD_1 con hongos estrechamente relacionadas, recuperadas de GenBank. Los valores sobre cada nodo son porcentajes de bootstrap obtenidos a partir de 1000 réplicas.



Se evaluaron también los efectos de la inoculación con la cepa aislada de *Trichoderma viride* sobre el crecimiento y la composición foliar de plántulas de tomate a los 20 días posteriores a la germinación, en comparación con un control sin inocular (Figura 2).

Figura 2
Efecto de la inoculación de Trichoderma viride en el crecimiento de plántulas de Solanum lycopersicum. Fotografías de plántulas de Solanum lycopersicum de 20 días de edad cultivadas en turba estéril a sin hongo (Control). Plantas de Solanum lycopersicum cultivadas con b solo lixiviado, c lixiviado con Trichoderma viride.



El contenido de clorofila en las plantas de tomate mostró variaciones significativas entre los tratamientos evaluados, mostradas en la figura 3a. El tratamiento con lixiviado con hongo (LH) presentó los valores más altos, con un promedio de 0.7205 µg/mg, mientras que el tratamiento con lixiviado sin hongo (LS) registró un promedio intermedio de 0.6518 µg/mg, mientras que el tratamiento con solo agua (SA) mostró los valores más bajos,

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

con un promedio de 0.5979 µg/mg. Los resultados obtenidos en este estudio permiten evidenciar de manera consistente el papel benéfico del lixiviado con hongo (LH) en el crecimiento y funcionamiento fisiológico de las plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*). La superioridad del tratamiento LH sobre LS y SA sugiere que la inoculación del hongo en el lixiviado genera una sinergia que promueve procesos fisiológicos clave, como la fotosíntesis, la absorción nutrimental y la acumulación de biomasa.

En primer lugar, el incremento significativo del contenido de clorofila en el tratamiento LH puede atribuirse a la capacidad de los hongos benéficos para modular el metabolismo vegetal a través de la producción de fitohormonas, la mejora de la absorción mineral y la estimulación de rutas de señalización asociadas a la tolerancia al estrés (Contreras-Cornejo et al., 2009). Estudios previos muestran que hongos como *Trichoderma spp.,* y micorrizas arbusculares mejoran la concentración de clorofila mediante la optimización de la disponibilidad de nutrientes esenciales, como nitrógeno, hierro y magnesio, los cuales son componentes estructurales fundamentales del complejo clorofílico (Harman et al., 2004; Rouphael et al., 2015). Por lo tanto, la mayor acumulación de clorofila observada en LH refleja una fisiología foliar más activa y eficiente.

El contenido foliar de nitrógeno presentó el mismo patrón observado en las demás variables. El tratamiento LH registró el mayor promedio con 1.69%, seguido del tratamiento LS con 1.16%. El tratamiento SA presentó los valores más bajos, con un promedio de 1.10% visto en la tabla de la figura 3b.

Los resultados del contenido de nitrógeno refuerzan esta tendencia. El mayor porcentaje en el tratamiento LH indica que la presencia del hongo pudo mejorar la mineralización del nitrógeno orgánico del lixiviado o bien facilitar mecanismos de absorción como la expresión de transportadores de nitratos y amonio (Ahemad & Kibret, 2014). Además, se ha documentado que ciertos hongos incrementan el volumen radical explorado, lo que permite que las plantas capten nitrógeno con mayor eficiencia, incluso en suelos o sustratos con disponibilidad nutrimental limitada (Smith & Read, 2008).

Un aspecto relevante es que el tratamiento LS, si bien mostró valores inferiores a LH, superó sistemáticamente al tratamiento SA. Esto sugiere que el lixiviado, aun sin hongo, aporta ciertos nutrientes y compuestos orgánicos que favorecen el crecimiento vegetal, tal como se ha reportado en el uso de lixiviados de compost y extractos orgánicos (Aziz et al., 2026; Shu et al., 2022) Sin embargo, la brecha entre LS y LH subraya la importancia del componente microbiano, puesto que la biotransformación llevada a cabo por el hongo genera metabolitos y procesos bioquímicos adicionales que potencian los efectos del lixiviado.

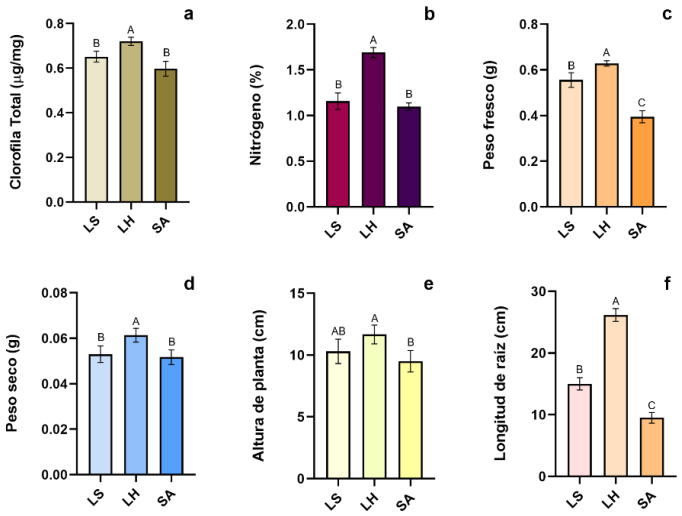
Por otro lado, el desempeño del tratamiento con solo agua (SA) destaca la relevancia de los aportes nutrimentales y microbianos para el desarrollo vegetal. Las plantas tratadas únicamente con agua carecieron de nutrientes disponibles y de estimulación microbiana, lo cual limitó tanto el crecimiento como la actividad fisiológica. Este resultado coincide con investigaciones donde tratamientos sin bio-insumos presentan menor biomasa, menor contenido de clorofila y menor capacidad de absorción nutrimental (Berruti et al., 2016).

El peso fresco total de las plantas presentó diferencias notorias entre los tratamientos. Plasmado en la figura 3c, el tratamiento LH obtuvo el valor promedio más alto (0.6283 g), seguido por el tratamiento LS con 0.5557 g. Al final, el tratamiento SA mostró el menor peso fresco, con un promedio de 0.3947 g.

En el peso seco, el tratamiento LH también mostró el valor promedio más elevado (0.0613 g), ligeramente superior al tratamiento LS (0.0530 g) y al tratamiento SA (0.0517 g). Aunque las diferencias entre tratamientos fueron menos acentuadas que en el peso fresco, se mantiene una tendencia consistente en la que LH supera a los demás tratamientos. Estos valores son mostrados en la figura 3d. En cuanto a la biomasa, tanto el peso fresco como el peso seco evidenciaron incrementos en el tratamiento LH. Esto concuerda con investigaciones donde microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPM, por sus siglas en inglés) mejoran la proliferación radicular, aumentan la capacidad de absorción nutrimental y estimulan la síntesis de compuestos relacionados con el crecimiento, como auxinas, giberelinas y compuestos derivados del metabolismo secundario (Contreras-Cornejo et al., 2015; Vinale et al., 2008). La mayor biomasa fresca podría deberse a una retención hídrica más eficiente o a un sistema radical más robusto, mientras que la biomasa seca incrementada sugiere una mayor acumulación de tejidos estructurales y compuestos orgánicos, lo cual está directamente relacionado con el metabolismo anabólico estimulado por PGPM (Jasim, 2021).

Figura 3

Análisis estadístico del efecto de la inoculación con lixiviado solo (LS), lixiviado con Trichoderma viride (LH) y solo agua (SA) sobre a) clorofila total, b) nitrógeno, c) peso fresco, d) peso seco, e) altura de planta y f) longitud de raíz. Los valores representan la media ± desviación estándar. Para el nitrógeno (N), los datos corresponden a 5 plantas por tratamiento; para los demás parámetros (altura de la planta, peso seco, longitud de la raíz, clorofila total), los datos corresponden a 12 plantas por tratamiento. Los valores con la misma letra en cada columna no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey (p ≤ 0,05).



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID087

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Tras 20 días de evaluación en plantas de tomate, se observaron variaciones notables en el desarrollo vegetativo según el tipo de tratamiento aplicado (LH, LS y SA). El tratamiento LH (Lixiviado con *Trichoderma viride*) promovió el mayor crecimiento radicular, alcanzando una longitud máxima de 27.0 cm y un promedio de 21.5 cm. Este desempeño supera considerablemente al tratamiento LS (Lixiviado solo), que registró un promedio de 15.0 cm. Por su parte, el tratamiento SA (solo agua) presentó el desarrollo más errático y el promedio más bajo de los tres grupos (14.5 cm), lo que sugiere que la adición de *Trichoderma* potencia significativamente la elongación de las raíces en comparación con el uso de lixiviado simple o agua. En cuanto a la altura de la planta, la tendencia de superioridad del tratamiento LH se mantuvo, con un promedio de 11.67 cm. Los tratamientos LS y SA mostraron resultados inferiores, con promedios de 10.5 cm y 9.5 cm respectivamente. Es relevante notar que, mientras en el grupo SA las medidas fueron más uniformes pero bajas, el tratamiento LH no solo incrementó la longitud de la raíz, sino que también se correlacionó con un vigor aéreo superior.

Los resultados obtenidos a los 20 días después del establecimiento mostraron que el tratamiento LH presentó las mayores medias tanto en longitud de raíz (21.5 cm) como en altura de planta (11.7 cm), lo que indica un mejor desarrollo inicial de las plantas de tomate. El crecimiento temprano del sistema radical es un indicador importante del vigor de las plántulas, debido a que una mayor elongación de la raíz favorece la absorción de agua y nutrientes, permitiendo un mejor desarrollo vegetativo durante las etapas iniciales del cultivo. Estudios recientes han señalado que la promoción del crecimiento radical en tomate está directamente relacionada con un incremento en la eficiencia fisiológica y nutricional de las plantas (Cervantes-Vázquez et al., 2021; Vani Obrzut et al., 2021).

Asimismo, diversos autores han reportado que factores biológicos y fisiológicos pueden estimular significativamente el crecimiento de raíces en tomate, favoreciendo el establecimiento temprano del cultivo (Alaguero-Cordovilla et al., 2021). El uso de *Trichoderma spp*., no solo mejora la arquitectura de la raíz, sino que induce una reprogramación metabólica en la planta que optimiza la captura de nitrógeno y fósforo, elementos presentes en el lixiviado. Esto explica por qué el grupo LH superó en un 43% la longitud radicular del grupo LS; el hongo actúa como un catalizador que permite a la planta aprovechar de manera más eficiente la carga orgánica del lixiviado (Zin & Badaluddin, 2020). En este sentido, la regulación hormonal y la actividad de microorganismos promotores del crecimiento vegetal pueden incrementar la biomasa y la arquitectura radical, repercutiendo positivamente en el crecimiento aéreo de la planta (Azarmi et al., 2011).

Por otra parte, el tratamiento SA presentó las menores medias tanto en longitud de raíz (14.5 cm) como en altura de planta (9.5 cm), lo que podría indicar una menor estimulación fisiológica durante la etapa inicial de desarrollo. Se ha documentado que condiciones desfavorables o tratamientos con baja capacidad de estimulación pueden limitar el crecimiento vegetativo y radical del tomate, afectando procesos metabólicos relacionados con la elongación celular y la acumulación de biomasa.

El tratamiento LS mostró valores intermedios en ambas variables evaluadas, con medias de 15.0 cm en raíz y 10.5 cm en altura de planta, lo que sugiere un efecto moderado sobre el crecimiento inicial. Resultados similares han sido reportados en investigaciones donde diferentes bioestimulantes o tratamientos agrícolas generan respuestas variables dependiendo de la disponibilidad de nutrientes, actividad fisiológica y adaptación de las plántulas al ambiente de crecimiento, la interacción raíz-*Trichoderma* modula la expresión de genes relacionados con las giberelinas y citoquininas, lo que se traduce en un mayor desarrollo del tallo y área foliar en plántulas de tomate (Vindas-Reyes et al., 2024).

IV. CONCLUSIONES

En conclusión, el lixiviado de vermicompost enriquecido con *Trichoderma viride* demostró ser una alternativa biotecnológica eficaz para promover el crecimiento y desarrollo fisiológico de las plántulas de tomate, al incrementar significativamente variables como el contenido de clorofila, el porcentaje de nitrógeno foliar, la biomasa fresca y seca, así como la longitud de raíz y la altura de planta. Los resultados obtenidos evidencian que la combinación del lixiviado con el hongo genera un efecto sinérgico capaz de mejorar la absorción y aprovechamiento de nutrientes, estimular procesos metabólicos relacionados con la fotosíntesis y favorecer un mayor vigor vegetal durante las etapas iniciales del cultivo.

Además, el desarrollo radicular observado en el tratamiento inoculado sugiere una mayor capacidad de adaptación y establecimiento de las plantas, lo que podría reflejarse en una mejor productividad bajo condiciones de cultivo. Aunque el lixiviado sin inoculación también presentó efectos benéficos en comparación con el control, la incorporación de *Trichoderma viride* potenció notablemente la respuesta fisiológica de las plantas, resaltando la importancia de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal en la agricultura sostenible. En este sentido, el uso de este bioinsumo representa una estrategia viable para disminuir la dependencia de fertilizantes y agroquímicos sintéticos, contribuyendo a la conservación del suelo y al desarrollo de sistemas de producción más sustentables y amigables con el ambiente.

Finalmente, se recomienda continuar con investigaciones en condiciones de campo y durante ciclos completos de producción para evaluar su efecto sobre el rendimiento, la calidad del fruto y la tolerancia de las plantas frente a estrés biótico y abiótico.

V. AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por las facilidades otorgadas para la realización de nuestro proyecto de investigación, tanto en el laboratorio para llevar a cabo los análisis como en el área de vermicompostaje para llevar a cabo las pruebas de los sustratos ensayados.

Agradecemos profundamente a las autoridades, docentes y personal del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Dgo., por el acceso a sus

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

instalaciones y equipos, así como por el invaluable apoyo técnico y logístico proporcionado a lo largo de todo el proyecto. Sin su colaboración y disposición, este trabajo no hubiera sido posible. El Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Dgo., ha demostrado ser una institución comprometida con el avance del conocimiento científico y la formación de profesionales capaces de enfrentar los desafíos actuales en el campo de la investigación y desarrollo tecnológico. Estamos profundamente agradecidos por su apoyo y esperamos poder continuar en futuros proyectos.

VI. REFERENCIAS

Abdenaceur, R., Farida, B., Mourad, D., Rima, H., Zahia, O., & Fatma, S.-H. (2022). Effective biofertilizer Trichoderma spp. Isolates with enzymatic activity and metabolites enhancing plant growth. *International Microbiology*, *25*(4), 817-829. https://doi.org/10.1007/s10123-022-00263-8

Abreo, E., Gómez Álvarez, M. I., & Gamboa Morillo, H. (2025). *Protocolo para la producción masiva de Trichoderma spp en medio sólido*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). https://hdl.handle.net/11324/23385

Ahemad, M., & Kibret, M. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University – Science*, *26*(1), 1-20. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.05.001

Aktar, W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: Their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, *2*(1), 1-12. https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7

Alabi, O. D., Arthur, G. D., Coopoosamy, R. M., Naidoo, K. K., Mbanjwa, S. T., & Tshapha, L. P. (2023). Vermicompost Leachate a Viable Bio-stimulant for Tomato Growth and Yield (Solanum lycopersicum). *Indian Journal Of Agricultural Research*, (Of). https://doi.org/10.18805/IJARe.AF-750

Alaguero-Cordovilla, A., Sánchez-García, A. B., Ibáñez, S., Albacete, A., Cano, A., Acosta, M., & Pérez-Pérez, J. M. (2021). An auxin-mediated regulatory framework for wound-induced adventitious root formation in tomato shoot explants. *Plant, Cell & Environment*, *44*(5), 1642-1662. https://doi.org/10.1111/pce.14001

Arthur, G. D., Aremu, A. O., Kulkarni, M. G., & Staden, J. V. (2012). Vermicompost Leachate Alleviates Deficiency of Phosphorus and Potassium in Tomato Seedlings. *HortScience*, *47*(9), 1304-1307. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.9.1304

Ashour, H. A., Esmail, S. E. A., & El-Attar, A. B. (2023). Effect of different nitrogen forms and bio-treatments on the growth and seed yield of downy safflower (Carthamus lanatus). *Advances in Horticultural Science*, *37*(2), 185-196. https://doi.org/10.36253/ahsc-12938

Azarmi, R., Hajieghrari, B., & Giglou, A. (2011). Effect of Trichoderma isolates on tomato seedling growth response and nutrient uptake. *African Journal of Biotechnology*, *10*, 5850-5855. https://doi.org/10.5897/AJB10.1600

Aziz, M. A., Majrashi, M. A., & Husain, A. (2026). Compost Amendments Enhance Crop Productivity and Yield for Sustainable Agriculture: A Global Meta-Analysis. *Processes*, *14*(7), 1102. https://doi.org/10.3390/pr14071102

Bandara, A. Y., & Kang, S. (2024). Trichoderma application methods differentially affect the tomato growth, rhizomicrobiome, and rhizosphere soil suppressiveness against Fusarium oxysporum. *Frontiers in Microbiology*, *15*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1366690

Berruti, A., Lumini, E., Balestrini, R., & Bianciotto, V. (2016). Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Natural Biofertilizers: Let's Benefit from Past Successes. *Frontiers in Microbiology*, *6*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01559

Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, *383*(1), 3-41. https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8

Cervantes-Vázquez, T. J. Á., Valenzuela-García, A. A., Cervantes-Vázquez, M. G., Guzmán-Silos, T. L., Fortiz, E. L., Rangel, P. P., & Rueda-Puente, E. O. (2021). Morphophysiological, Enzymatic, and Elemental Activity in Greenhouse Tomato Saladette Seedlings from the Effect of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria. *Agronomy*, *11*(5), 1008. https://doi.org/10.3390/agronomy11051008

Charoenrak, P., Chamswarng, C., Intanoo, W., & Keawprasert, N. (2019). THE EFFECTS OF VERMICOMPOST MIXED WITH TRICHODERMA ASPERELLUM ON THE GROWTH AND PYTHIUM ROOT ROT OF LETTUCES. *GEOMATE Journal*, *17*(61), 215-221.

Chinsamy, M., Kulkarni, M. G., & Staden, J. V. (2014). Vermicompost Leachate Reduces Temperature and Water Stress Effects in Tomato Seedlings. *HortScience*, *49*(9), 1183-1187. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.9.1183

Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., Cortés-Penagos, C., & López-Bucio, J. (2009). Trichoderma virens, a plant beneficial fungus, enhances biomass production and promotes lateral root growth through an auxin-dependent mechanism in Arabidopsis. *Plant Physiology*, *149*(3), 1579-1592. https://doi.org/10.1104/pp.108.130369

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., Vergara, A. G., & López-Bucio, J. (2015). Trichoderma Modulates Stomatal Aperture and Leaf Transpiration Through an Abscisic Acid-Dependent Mechanism in Arabidopsis. *Journal of Plant Growth Regulation*, *34*(2), 425-432. https://doi.org/10.1007/s00344-014-9471-8

Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., … Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, *478*(7369), 337-342. https://doi.org/10.1038/nature10452

Guzmán-Guzmán, P., Etesami, H., & Santoyo, G. (2025). Trichoderma: A multifunctional agent in plant health and microbiome interactions. *BMC Microbiology*, *25*(1), 434. https://doi.org/10.1186/s12866-025-04158-2

Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). Trichoderma species—Opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews. Microbiology*, *2*(1), 43-56. https://doi.org/10.1038/nrmicro797

Hasna, M. K., Paul, N. R., Haque, M. M., Bir, Md. S. H., Ali, Md. A., & Chong, K. P. (2025). Biocontrol efficacy of Trichoderma asperellum against fusarium wilt in tomato plants by induction of the host defense genes. *Discover Plants*, *2*(1), 136. https://doi.org/10.1007/s44372-025-00224-1

J. J. Doyle and J. L. Doyle, "Isolation of Plant DNA from Fresh Tissue," Focus, Vol. 12, No. 1, 1990, pp. 13-15. - References—Scientific Research Publishing. (s. f.). Recuperado 23 de enero de 2026, de https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=633608

Jasim, S. (2021). -Based Products and their Widespread Use in Agriculture. *AACE Clinical Case Reports*, *7*(1), 1.

Jha, B., Gontia, I., & Hartmann, A. (2012). The roots of the halophyte Salicornia brachiata are a source of new halotolerant diazotrophic bacteria with plant growth-promoting potential. *Plant and Soil*, *356*(1), 265-277. https://doi.org/10.1007/s11104-011-0877-9

Jiang, X., Lu, C., Hu, R., Shi, W., Zhou, L., Wen, P., Jiang, Y., & Lo, Y. M. (2023). Nutritional and microbiological effects of vermicompost tea in hydroponic cultivation of maple peas (Pisum sativum var. Arvense L.). *Food Science & Nutrition*, *11*(6), 3184-3202. https://doi.org/10.1002/fsn3.3299

Koskey, G., Avio, L., Turrini, A., Sbrana, C., & Bàrberi, P. (2023). Biostimulatory effect of vermicompost extract enhances soil mycorrhizal activity and selectively improves crop productivity. *Plant and Soil*, *484*(1), 183-199. https://doi.org/10.1007/s11104-022-05783-w

Loera-Muro, A., Troyo-Diéguez, E., Murillo-Amador, B., Barraza, A., Caamal-Chan, G., Lucero-Vega, G., & Nieto-Garibay, A. (2021). Effects of Vermicompost Leachate versus Inorganic Fertilizer on Morphology and Microbial Traits in the Early Development Growth Stage in Mint (Mentha spicata L.) And Rosemary (Rosmarinus officinalis L.) Plants under Closed Hydroponic System. *Horticulturae*, *7*(5). https://doi.org/10.3390/horticulturae7050100

Long, J. (1995). De tomates y jitomates en el siglo XVI. *Estudios de Cultura Náhuatl*, *25*, 239-252.

Martinez, Y., Ribera, J., Schwarze, F. W. M. R., & De France, K. (2023). Biotechnological development of Trichoderma-based formulations for biological control. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *107*(18), 5595-5612. https://doi.org/10.1007/s00253-023-12687-x

Metwally, R. A., & Soliman, S. A. (2023). Alleviation of the adverse effects of NaCl stress on tomato seedlings (Solanum lycopersicum L.) by Trichoderma viride through the antioxidative defense system. *Botanical Studies*, *64*(1), 4. https://doi.org/10.1186/s40529-023-00368-x

Razifard, H., Ramos, A., Della Valle, A. L., Bodary, C., Goetz, E., Manser, E. J., Li, X., Zhang, L., Visa, S., Tieman, D., van der Knaap, E., & Caicedo, A. L. (2020). Genomic Evidence for Complex Domestication History of the Cultivated Tomato in Latin America. *Molecular Biology and Evolution*, *37*(4), 1118-1132. https://doi.org/10.1093/molbev/msz297

Ren, L., Lv, J., Zhang, F., Dou, B., Li, L., Wang, Y., & Zhang, Y. (2025). Integrated fertilization with organic manure and Trichoderma enhances wheat productivity and soil nutrient availability. *Frontiers in Plant Science*, *16*. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1687216

Rouphael, Y., Franken, P., Schneider, C., Schwarz, D., Giovannetti, M., Agnolucci, M., Pascale, S. D., Bonini, P., & Colla, G. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungi act as biostimulants in horticultural crops. *Scientia Horticulturae, Biostimulants in Horticulture*, *196*, 91-108. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.002

Sachdev, S., Singh, A., & Singh, R. P. (2018). Optimization of culture conditions for mass production and bio-formulation of Trichoderma using response surface methodology. *3 Biotech*, *8*(8), 360. https://doi.org/10.1007/s13205-018-1360-6

Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature*

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Ecology & Evolution, *3*(3), 430-439. https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y

Sehim, A. E., Hewedy, O. A., Altammar, K. A., Alhumaidi, M. S., & Abd Elghaffar, R. Y. (2023). Trichoderma asperellum empowers tomato plants and suppresses Fusarium oxysporum through priming responses. *Frontiers in Microbiology*, *14*, 1140378. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1140378

Shaikh, I. R., Shaikh, P. R., Nomaan, M. H., & Shaikh, R. R. (2025). Soil Contamination by Heavy Metals and Pesticides: A Critical Review of Toxicological Mechanisms, Sustainable Remediation Strategies, and One Health Implications. *International Journal of Plant & Soil Science*, *37*(12), 290-317. https://doi.org/10.9734/ijpss/2025/v37i125893

Shu, X., He, J., Zhou, Z., Xia, L., Hu, Y., Zhang, Y., Zhang, Y., Luo, Y., Chu, H., Liu, W., Yuan, S., Gao, X., & Wang, C. (2022). Organic amendments enhance soil microbial diversity, microbial functionality and crop yields: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, *829*, 154627. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154627

Smith, S. E., & Read, D. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6

Vani Obrzut, V., Mógor, Á. F., Mazaro, S. M., Mógor, G., Vani Obrzut, V., Mógor, Á. F., Mazaro, S. M., & Mógor, G. (2021). Initial growth, production in consecutive years and biochemical changes on tomato cultivars in organic system with application of Bacillus subtilis. *Idesia (Arica)*, *39*(2), 47-55. https://doi.org/10.4067/S0718-34292021000200047

Vinale, F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E. L., Marra, R., Woo, S. L., & Lorito, M. (2008). *Trichoderma*–plant–pathogen interactions. *Soil Biology and Biochemistry*, *40*(1), 1-10. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.07.002

Vindas-Reyes, E., Chacón-Cerdas, R., & Rivera-Méndez, W. (2024). Trichoderma Production and Encapsulation Methods for Agricultural Applications. *AgriEngineering*, *6*(3), 2366-2384. https://doi.org/10.3390/agriengineering6030138

Weisburg, W. G., Barns, S. M., Pelletier, D. A., & Lane, D. J. (1991). 16S ribosomal DNA amplification for phylogenetic study. *Journal of Bacteriology*, *173*(2), 697-703. https://doi.org/10.1128/jb.173.2.697-703.1991

Zhang, Z., & Huang, R. (2013). Analysis of Malondialdehyde, Chlorophyll Proline, Soluble Sugar, and Glutathione Content in Arabidopsis seedling. *Bio-Protocol*, *3*(14). https://doi.org/10.21769/BioProtoc.817

Zin, N. A., & Badaluddin, N. A. (2020). Biological functions of *Trichoderma* spp. For agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences*, *65*(2), 168-178. https://doi.org/10.1016/j.aoas.2020.09.003

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización [Conceptualization]	Tania Elizabeth Velásquez Chávez
2	Curación de datos [Data curation]	José María Juárez Hernández
3	Análisis formal [Formal analysis]	Alan Joel Servín Prieto
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Alan Joel Servín Prieto
5	Investigación [Investigation]	Tania Elizabeth Velásquez Chávez, Mónica Hernández López y Alan Joel Servín Prieto
6	Methodología [Methodology]	Tania Elizabeth Velásquez Chávez
7	Administración del proyecto [Project administration]	Tania Elizabeth Velásquez Chávez, Mónica Hernández López y Alan Joel Servín Prieto
8	Recursos [Resources]	Tania Elizabeth Velásquez Chávez
9	Software [Software]	Marcial Humberto Vásquez Corral
10	Supervision [Supervision]	Mónica Hernández López
11	Validación [Validation]	José María Juárez Hernández
12	Visualización [Visualization]	Marcial Humberto Vásquez Corral
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Mónica Hernández López
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Tania Elizabeth Velásquez Chávez

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID087

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Diseño y Validación de un Instrumento para Evaluar Necesidades Comunicativas en Autismo No Hablante desde la Perspectiva de Personas Cuidadoras

Design and Validation of an Instrument to Assess Communicative Needs in Non-Speaking Autism from the Perspective of Caregivers

Valenzuela-Martínez, P.A.[1]✉; Rodríguez-Chacón, R.L.[2]

Datos de Adscripción

[1]✉ Valenzuela Martínez, Patricia Abigail
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. División de Ingeniería en Sistemas Automotrices. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
patricia.vm@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1504-7428

[2] Rodríguez Chacón, Rocio Lorena
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. División de Ingeniería en Sistemas Automotrices. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
rocio.rc@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0842-1585

Resumen **- Este artículo presenta el diseño y la validación preliminar de un instrumento creado para identificar las necesidades comunicativas de niñas y niños autistas no hablantes o mínimamente hablantes, así como los criterios para diseñar soluciones de apoyo. A través de un cuestionario digital dividido en cinco dimensiones (necesidades de comunicación, preferencias de uso, dificultades, condiciones de acceso y expectativas de utilidad), buscamos sentar las bases para desarrollar sistemas de comunicación que realmente respondan al entorno familiar y escolar.Para asegurar la pertinencia y claridad del instrumento, realizamos una validación de contenido mediante juicio de expertos (terapeutas, docentes y padres de familia), seguida de una prueba piloto. El estudio siguió un diseño instrumental, transversal y exploratorio. La validez de contenido se examinó con un panel multidisciplinario de diez personas expertas mediante los índices de validez de contenido por reactivo y por escala. Posteriormente, la versión depurada se aplicó de manera piloto a 40 personas cuidadoras. Los resultados revelaron una alta consistencia interna en todas las dimensiones, con valores del coeficiente alfa de Cronbach entre 0.84 y 0.95. Estos hallazgos preliminares confirman que el cuestionario es una herramienta sólida y nos permiten avanzar hacia una fase de aplicación más amplia, con el objetivo final de guiar el diseño de apoyos comunicativos verdaderamente accesibles y contextualizados.**

Palabras Clave **- Autismo No Hablante, Comunicación Aumentativa y Alternativa, Necesidades Comunicativas, Personas Cuidadoras, Validación de Instrumentos.**

Abstract **- This study reports the design and preliminary validation of an instrument to assess communicative needs and relevant design criteria for communication support solutions for autistic children who are non-speaking or minimally speaking. The aim was to obtain a questionnaire with initial evidence of validity and reliability to support future stages of research focused on the development of accessible and contextually relevant communication tools for family and school environments. A digital questionnaire was developed and organized into five dimensions: communicative needs, usage preferences, perceived difficulties, access conditions, and expectations of usefulness. Content validity was established through expert judgment with the participation of occupational therapists, special education teachers, speech and language therapists, and caregivers, which made it possible to refine the wording, relevance, and clarity of the items. A pilot application was then conducted, and internal consistency was analyzed using Cronbach's alpha. Preliminary findings showed adequate to high reliability across all five dimensions, with coefficients ranging from 0.84 to 0.95 after item adjustment and refinement. These results provide favorable initial evidence for the consistency of the instrument and justify progressing to a broader data collection stage. The study concludes that the questionnaire constitutes a promising tool for examining communicative needs in this population and may support future confirmatory factor analysis and structural equation modeling to guide the design of socially and educationally relevant communication supports.**

Keywords **- Augmentative and Alternative Communication, Caregivers, Communicative Needs, Instrument Validation, Non-Speaking Autism.**

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID088

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema y objetivo del estudio

La comunicación funcional constituye una condición básica para la participación social, la autonomía cotidiana y el acceso a oportunidades educativas. En el caso de niñas y niños autistas no hablantes o mínimamente hablantes, la ausencia o el uso limitado del habla no implica ausencia de intención comunicativa; por el contrario, suele coexistir con múltiples formas de expresión corporal, gestual, visual y conductual que requieren ser interpretadas dentro de contextos específicos. Esta distinción es central porque evita reducir el problema a la falta de lenguaje oral y permite comprenderlo como una interacción entre necesidades personales, barreras del entorno y disponibilidad de apoyos comunicativos pertinentes.

Entender la comunicación desde esta perspectiva transforma la forma en que evaluamos las necesidades de estas infancias. Ya no basta con hacer un inventario del vocabulario o contar las emisiones orales; es fundamental descubrir qué desean expresar, en qué situaciones enfrentan mayores obstáculos y qué recursos tecnológicos o cotidianos encajan mejor con la realidad de sus familias. Además, es indispensable escuchar las expectativas de quienes cuidan de ellos, especialmente en contextos donde las barreras económicas, geográficas o institucionales dificultan el acceso a terapias especializadas o a dispositivos de alta tecnología.

El presente artículo se centra en la primera fase de un proyecto mayor orientado al desarrollo posterior de un comunicador accesible y contextualizado. En esta etapa no se evalúa todavía la eficacia de un prototipo tecnológico ni se pretende establecer una estructura factorial definitiva. El propósito específico es presentar el diseño y la validación preliminar del instrumento INCA-O, orientado a recuperar la perspectiva de personas cuidadoras sobre necesidades comunicativas, dificultades, condiciones de acceso, preferencias de uso y expectativas de utilidad. Con ello se busca contar con una base empírica inicial para que las decisiones de diseño del futuro sistema no partan de supuestos generales, sino de información organizada y técnicamente sustentada.

1.2 Marco Teórico

1) Autismo no hablante y mínimamente hablante

El Trastorno del Espectro Autista (TEA) se define como una condición del neurodesarrollo con divergencias en la socialización, comunicación y procesamiento sensorial. Dentro de esta población, existe un sector con necesidades complejas de comunicación, a menudo categorizado como no hablante (NV) o mínimamente hablante (MV). Existe una discrepancia conceptual en la literatura sobre estos términos: algunos autores definen a los individuos MV como aquellos que poseen un vocabulario funcional de hasta 30 o 50 palabras, mientras que otros reservan la etiqueta NV para quienes tienen un uso inconsistente o nulo del lenguaje hablado (Koegel et al., 2020; Orozco Greenwell et al., 2025). Se estima que entre el 25% y el 30% de los niños con autismo no desarrollan un lenguaje verbal suficiente para satisfacer sus necesidades diarias (Posar & Visconti, 2022). Es crucial entender que la ausencia de habla no es sinónimo de falta de intención comunicativa ni de incapacidad intelectual, dado que este grupo presenta una gran heterogeneidad en su funcionamiento cognitivo (Koegel et al., 2020).

2) Necesidades comunicativas

La comunicación es un pilar de la interacción humana y un derecho fundamental. En personas autistas no hablantes, las necesidades comunicativas no se limitan a la solicitud de objetos (hambre, dolor), sino que abarcan la expresión de emociones, pensamientos, rechazo y el establecimiento de vínculos sociales (Orozco Greenwell et al., 2025). Estas necesidades se manifiestan a través de lenguajes expresivos multimodales, que incluyen gestos, miradas, ritmos corporales y expresiones faciales (Flórez Villada, 2024). Un enfoque basado en derechos humanos exige que el entorno reconozca estos lenguajes para evitar la frustración, el aislamiento y las conductas desafiantes derivadas de la impotencia comunicativa (Canal Laitón, 2024).

3) Evaluación de necesidades comunicativas

La evaluación de las necesidades lingüísticas y funcionales es el paso inicial para cualquier apoyo efectivo. Este proceso debe alejarse del modelo médico centrado en el déficit para adoptar una visión social que identifique las potencialidades en entornos naturales (Ugarte Niola, 2024). La evaluación debe ser interdisciplinaria e integrar observaciones directas, muestras de lenguaje natural y el reporte de los cuidadores (Plate, 2025). Es esencial identificar qué motiva al usuario y cuáles son sus capacidades actuales, desde comportamientos pre-intencionales hasta el uso de símbolos, para personalizar las herramientas de apoyo y reducir el riesgo de abandono del sistema (Canal Laitón, 2024; Perichon, 2025).

4) Tecnología asistiva (TA) y Comunicación Aumentativa y Alternativa (CAA)

La Tecnología Asistiva (TA) se define como un conjunto de estrategias, servicios y dispositivos diseñados específicamente para promover la independencia y aumentar la participación de las personas con discapacidad en sus entornos cotidianos (Canal Laitón, 2024; Ugarte Niola, 2024). En este marco, los Sistemas Aumentativos y Alternativos de Comunicación (SAAC o CAA) guardan una relación directa con la TA, al ser considerados una categoría especializada enfocada en compensar o apoyar las dificultades persistentes en la producción del lenguaje verbal (American Speech-Language-Hearing Association [ASHA], 2022; Canal Laitón, 2024). Esta relación implica la adaptación de recursos tecnológicos, que pueden variar desde soportes físicos básicos hasta herramientas electrónicas sofisticadas con salida de voz, transformándolos en productos de apoyo que permiten a las personas con necesidades complejas de comunicación interactuar de forma autónoma y ejercer su derecho a ser escuchados (Orozco Greenwell et al., 2025; Ugarte Niola, 2024). De manera complementaria, la CAA engloba estrategias y tecnologías que apoyan (aumentativa) o sustituyen (alternativa) el habla natural. Se clasifican en sistemas sin ayuda (uso del cuerpo, gestos, señas) y con ayuda (tableros físicos, pictogramas

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID088

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

o dispositivos electrónicos con salida de voz) (ASHA, 2022; Canal Laitón, 2024). A pesar de los mitos persistentes, la evidencia científica demuestra que la CAA no frena el desarrollo del habla; al contrario, facilita la aparición del lenguaje oral en el 89% de los casos (Cantos Vilaplana, 2022). Asimismo, la literatura actual sostiene que no existen prerrequisitos cognitivos para iniciar su uso, recomendando la intervención temprana desde antes de los dos años para mejorar las trayectorias de desarrollo (Canal Laitón, 2024; Cantos Vilaplana, 2022).

5) Perspectiva de personas cuidadoras

Los cuidadores, mayoritariamente madres, actúan como mediadores fundamentales y "segundos usuarios" de los sistemas de comunicación. Su perspectiva es insustituible, ya que suelen detectar las primeras señales de alerta y son quienes implementan las herramientas en la rutina diaria (Sazo Ávila et al., 2024). Para las familias, un sistema de CAA efectivo se convierte en "la voz" de su hijo, lo que reduce el estrés parental, mejora la competencia percibida del cuidador y eleva la calidad de vida familiar al permitir una comprensión mutua (Sazo Ávila et al., 2024). Cualquier instrumento de evaluación debe considerar las percepciones y desafíos de las familias para asegurar su pertinencia cultural y práctica (Orozco Greenwell et al., 2025). Por otro lado, la literatura subraya que un sistema de CAA es verdaderamente efectivo para las familias cuando actúa como un canal funcional de expresión que se integra de manera orgánica en la rutina diaria, sin generar una sobrecarga de cuidados ni un aumento del estrés parental en el hogar (Cantos Vilaplana, 2022; Sazo Ávila et al., 2024). Para lograr esta eficacia, es imperativo que el sistema se base en principios de usabilidad, siendo fácil de usar, portátil y personalizado según los intereses del usuario, lo que evita el abandono de la herramienta y mejora la calidad de vida familiar (Canal Laitón, 2024; Sazo Ávila et al., 2024).

6) Barreras, facilitadores y condiciones de acceso

El acceso a la comunicación funcional enfrenta múltiples obstáculos. Entre las barreras destacan el alto costo de los dispositivos de alta tecnología, la falta de formación especializada en los profesionales y las normativas escolares que prohíben el uso de artículos electrónicos (Canal Laitón, 2024; Sazo Ávila et al., 2024). Como facilitadores, se identifican los marcos legales inclusivos (como la Ley 21.545 en Chile o normativas en Colombia) y la disponibilidad de recursos estandarizados de libre acceso (Canal Laitón, 2024; Sazo Ávila et al., 2024). En este ámbito, resulta fundamental el uso del Centro Aragonés para la Comunicación Aumentativa y Alternativa (ARASAAC), una plataforma y portal de referencia internacional que ofrece un amplio repertorio de pictogramas y materiales validados de libre acceso que facilitan la creación de sistemas de comunicación funcionales y de bajo costo (Alonso Alonso, 2025; Canal Laitón, 2024). Al contar con este respaldo, las familias pueden transformar la comunicación en una experiencia exitosa que realmente dé voz a sus hijos (Sazo Ávila et al., 2024). La creación de entornos que presuman la competencia del individuo y el apoyo emocional a las familias son condiciones esenciales para garantizar la equidad comunicativa (Cantos Vilaplana, 2022; Sazo Ávila et al., 2024).

7) Fundamentos metodológicos para el diseño y validación del instrumento

El desarrollo de instrumentos para esta población debe regirse por metodologías participativas. Se destacan el Diseño Centrado en el Usuario (UCD) y la Investigación Basada en Diseño (IBD), los cuales aplican ciclos iterativos de análisis, prototipado, pruebas de campo y refinamiento (Canal Laitón, 2024; Orozco Greenwell et al., 2025). Para la validación científica, se recomienda un enfoque mixto: una fase cualitativa mediante juicio de expertos y entrevistas semiestructuradas para asegurar la relevancia de los ítems, y una fase cuantitativa que utilice el Índice de Validez de Contenido (CVI) para medir la pertinencia y la System Usability Scale (SUS) para evaluar la facilidad de uso y satisfacción del usuario final (Alonso Alonso, 2025). El análisis de los datos cualitativos suele apoyarse en herramientas como Atlas.ti para garantizar el rigor temático (Alonso Alonso, 2025).

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Diseño metodológico

Para este estudio optamos por un diseño instrumental y transversal, con un alcance exploratorio. Dividimos el trabajo en dos grandes momentos: primero, construimos un banco inicial de preguntas y lo sometimos al escrutinio de un panel de expertos; después, realizamos una prueba piloto con la versión ajustada para analizar su consistencia interna. Esta ruta metodológica no es casual: refleja la visión de todo el proyecto, donde validar el instrumento es el primer paso indispensable antes de traducir los resultados en características de diseño para un nuevo sistema de comunicación. Aunque nuestro análisis de confiabilidad fue principalmente cuantitativo, nos nutrimos profundamente de las aportaciones cualitativas de los expertos. Gracias a sus observaciones, logramos afinar la redacción y garantizar la sensibilidad de las preguntas, entendiendo la validación no como un mero trámite estadístico, sino como un diálogo continuo para enriquecer nuestras ideas.

2.2 Participantes y procedimiento de recolección

En la fase de validación de contenido participó un panel multidisciplinario de diez personas expertas, integrado por profesionales de terapia ocupacional, educación especial y comunicación o lenguaje, así como por personas cuidadoras con experiencia directa en el acompañamiento de niñas y niños autistas no hablantes o mínimamente hablantes.

Posteriormente, lanzamos la prueba piloto a través de un formulario digital dirigido a cuidadores. Tras filtrar las respuestas, trabajamos con 40 casos válidos, una muestra adecuada para esta etapa exploratoria. En todo el proceso, el rigor ético fue nuestra prioridad: la participación fue totalmente voluntaria, la información se analizó de forma anónima y agregada, y, al enfocarnos en la perspectiva de los cuidadores, evitamos someter a las infancias a tareas experimentales o procedimientos extenuantes.

2.3 Consideraciones éticas y manejo de datos

La información demográfica se consideró únicamente como variable de caracterización y no como criterio para emitir juicios individuales sobre las familias o sobre las niñas y niños. En el procesamiento de datos se priorizó la depuración de registros

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

incompletos, la codificación ordinal de respuestas y la revisión de consistencia interna por dimensión. Para etapas posteriores, especialmente si se realizan pruebas de prototipo con usuarios directos, será necesario fortalecer los procedimientos de consentimiento informado, asentimiento cuando sea pertinente, resguardo de datos y evaluación de riesgos asociados al uso de tecnología asistiva en contextos reales.

2.4 Construcción del instrumento INCA-O

El INCA-O fue diseñado como una herramienta para identificar necesidades comunicativas, barreras contextuales, condiciones de acceso, preferencias de uso y expectativas respecto a un futuro comunicador de bajo costo. La construcción inicial partió de la revisión de literatura sobre autismo no hablante, CAA, diseño centrado en el usuario, experiencias de personas cuidadoras y barreras de adopción tecnológica. A partir de esa revisión se formuló un banco de reactivos organizado inicialmente en dominios conceptuales asociados con necesidades, diseño, barreras, autoeficacia/apoyo e intención o beneficio esperado.

Durante la depuración posterior al juicio experto, la estructura del instrumento fue reorganizada para facilitar su aplicación a personas cuidadoras. La versión piloto se articuló en cinco dimensiones operativas: Necesidades, Preferencias, Barreras, Condiciones y Expectativas. Esta reorganización permitió distinguir entre aquello que la persona necesita comunicar, las características deseables del apoyo, los obstáculos percibidos, las condiciones reales de acceso y la utilidad esperada del sistema. Tal separación es importante porque una necesidad comunicativa alta no implica automáticamente factibilidad tecnológica, y una alta expectativa de utilidad puede verse limitada por barreras de costo, tiempo, capacitación o aceptación escolar.

2.5 Justificación operativa de las dimensiones

La dimensión de necesidades se incorporó para identificar el contenido funcional que debe cubrir un sistema de comunicación. Esta dimensión no se reduce a necesidades fisiológicas; incluye manifestaciones de elección, rechazo, petición de ayuda, expresión de emociones, comunicación de dolor o malestar y participación en actividades cotidianas. Su presencia en el instrumento permite priorizar vocabulario y escenarios de uso desde la perspectiva de quienes observan con mayor frecuencia los intentos comunicativos.

La dimensión de Preferencias se incluyó porque la adopción de un apoyo comunicativo depende en parte de la forma en que el usuario y la familia interactúan con él. Algunos niños pueden responder mejor a fotografías reales, otros a pictogramas, objetos, colores, categorías visuales o rutinas muy estructuradas. Asimismo, algunas familias pueden preferir recursos impresos por su bajo costo, mientras que otras pueden inclinarse por una herramienta digital si ya cuentan con celular o tableta. Medir preferencias permite diseñar opciones flexibles y no imponer un único formato de comunicación.

La dimensión de Barreras permite documentar los obstáculos que dificultan la implementación. Estos obstáculos pueden aparecer en distintos niveles: económicos, escolares, familiares, tecnológicos, actitudinales o de capacitación. Incluirlos en el instrumento es fundamental porque una solución puede fracasar si solo se diseña desde el ideal de uso y no desde las restricciones reales. Además, las barreras ayudan a distinguir entre falta de interés, falta de recursos, falta de conocimiento y falta de apoyo institucional, cuatro situaciones que requieren estrategias diferentes.

La dimensión de Condiciones se orienta a identificar la factibilidad material y contextual del uso. Esta dimensión considera aspectos como disponibilidad de dispositivos, conectividad, tiempo de acompañamiento, espacios de aplicación, apoyo familiar y posibilidades de uso en escuela o terapia. Su función es convertir el diagnóstico en información útil para la toma de decisiones de diseño. Por ejemplo, si la mayoría de las familias no cuenta con conectividad estable, una solución dependiente de internet sería poco pertinente aunque técnicamente atractiva.

Por último, la dimensión de Expectativas permite explorar qué beneficios esperan las personas cuidadoras de un comunicador. Esta información es importante porque las expectativas influyen en la aceptación, la continuidad de uso y la percepción de utilidad. Sin embargo, también deben interpretarse con cuidado: expectativas muy altas pueden reflejar una necesidad no atendida más que una garantía de adopción. Por ello, esta dimensión funciona como indicador de valor percibido, pero debe complementarse en fases futuras con pruebas de usabilidad y observación en contexto real.

2.6 Validez de contenido

Cada juez valoró los reactivos mediante una escala ordinal de 1 a 4 en tres criterios: relevancia, claridad y pertinencia cultural/respeto. Se consideraron favorables las puntuaciones de 3 y 4. El I-CVI se obtuvo dividiendo el número de jueces que asignaron puntuaciones de 3 o 4 entre el total de jueces. El S-CVI/Ave se calculó como el promedio de los I-CVI de los reactivos pertenecientes a cada dimensión. Para la interpretación se consideraron favorables los valores cercanos o superiores a .80, mientras que los valores inferiores se utilizaron como criterio para revisar, reformular o reubicar reactivos. Además del análisis cuantitativo, se revisaron los comentarios abiertos del panel con el fin de identificar reactivos ambiguos, términos que pudieran interpretarse de forma poco clara y contenidos que requerían reubicación conceptual.

Tabla 1.

Síntesis de validez de contenido por dimensión

Intención/Beneficio	S-CVI/Ave = 0.975, muy favorable.
Necesidades	S-CVI/Ave = 0.917, favorable.
Diseño	S-CVI/Ave = 0.906, favorable.
Autoeficacia/Apoyo	S-CVI/Ave = 0.883, favorable.
Barreras	S-CVI/Ave = 0.621, revisión necesaria.
Escala global	S-CVI/Ave = 0.842, evidencia inicial aceptable.

Las denominaciones presentadas en la Tabla 1 corresponden a la estructura inicial sometida al juicio experto. Después de la revisión, los reactivos de Diseño se reorganizaron principalmente en Preferencias y Condiciones; los de Autoeficacia/Apoyo se integraron en Condiciones; y los de Intención/Beneficio dieron origen a la dimensión Expectativas. Por esta razón, las denominaciones de la fase de contenido no coinciden literalmente con las utilizadas en la prueba piloto.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID088

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Los resultados del juicio experto mostraron un patrón diferenciado. Las dimensiones de Intención/Beneficio, Necesidades y Diseño obtuvieron los valores más altos, lo que sugiere que el panel consideró pertinentes los contenidos relacionados con el propósito del comunicador, las necesidades a cubrir y los criterios generales de diseño. Autoeficacia/Apoyo también presentó un valor favorable. En contraste, Barreras obtuvo el S-CVI/Ave más bajo, con mayor dispersión en relevancia, claridad y pertinencia cultural.

Este resultado no se interpretó como evidencia suficiente para descartar por completo el dominio de barreras, sino como una señal de que sus reactivos requerían mayor refinamiento. Las barreras no son un constructo homogéneo: algunas remiten a condiciones económicas, otras a capacitación, aceptación social, disponibilidad de internet, uso del tiempo o normas escolares. Por ello, varios reactivos fueron reformulados, reubicados o expresados con lenguaje más concreto antes de pasar a la versión aplicada.

2.7 Trazabilidad de ajustes del instrumento

La depuración del instrumento siguió tres criterios: conservar reactivos con alta pertinencia conceptual, reformular reactivos con valor teórico pero problemas de claridad, y reubicar o eliminar reactivos cuyo contenido se traslapaba con otra dimensión. Este proceso permitió mantener la correspondencia entre el marco teórico y la versión aplicada, evitando que la escala creciera de forma innecesaria o que se conservaran ítems ambiguos solo por estar presentes en el banco inicial.

En particular, los reactivos asociados con barreras fueron revisados para diferenciar entre obstáculos propios del entorno y características personales del niño o niña. Esta distinción resulta importante porque las barreras no deben atribuirse únicamente a la persona usuaria. Cuando un sistema no se utiliza, la causa puede estar en el diseño, en la capacitación, en la falta de apoyo escolar, en el costo o en la sobrecarga familiar. Por ello, la redacción final buscó desplazar la mirada desde el déficit individual hacia condiciones modificables del contexto.

2.8 Consistencia interna

La consistencia interna de la versión piloto se estimó mediante el coeficiente alfa de Cronbach, calculado para la escala global y para cada una de las cinco dimensiones aplicadas. También se revisaron correlaciones ítem-total corregidas y el comportamiento del alfa si el reactivo se eliminaba. Las variables de perfil, como la tolerancia sensorial, se mantuvieron fuera del análisis de confiabilidad porque su función fue descriptiva y no correspondía a un constructo latente central del instrumento.

Tabla 2.

Consistencia interna preliminar de la versión piloto

Necesidades	α = 0.943, consistencia alta.
Preferencias	α = 0.835, consistencia aceptable-alta.
Barreras	α = 0.879, consistencia alta tras depuración.
Condiciones	α = 0.980, consistencia muy alta; posible redundancia.
Expectativas	α = 0.924, consistencia alta; posible efecto de techo.
Escala global	α = 0.928, confiabilidad global alta.

Los coeficientes obtenidos indican una confiabilidad preliminar favorable. La escala global alcanzó un alfa de 0.928 y todas las dimensiones se ubicaron en rangos adecuados a altos. Preferencias presentó el valor más bajo, aunque dentro de un rango aceptable; esto es coherente con la naturaleza del dominio, ya que las preferencias pueden variar de acuerdo con edad, contexto familiar, exposición previa a pictogramas o dispositivos, nivel de apoyo requerido y experiencias previas de la persona cuidadora.

El alfa extremadamente alto en condiciones debe interpretarse con cautela. Si bien indica fuerte coherencia interna, también puede reflejar solapamiento entre reactivos o una medición muy estrecha de aspectos de acceso. En estudios posteriores convendrá revisar si todos los ítems aportan información diferenciada o si algunos pueden integrarse, reformularse o reducirse para mejorar la parsimonia del instrumento. De forma similar, en Expectativas se observó la posibilidad de respuestas homogéneas y efectos de techo, lo que resulta comprensible en una población que suele demandar apoyos comunicativos accesibles, pero limita la sensibilidad discriminante de algunos reactivos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Interpretación de los hallazgos

Los resultados de esta primera fase confirman que el INCA-O cuenta con una validez de contenido y una consistencia interna favorables. Más allá de los números, el estudio logró su propósito central: construir una herramienta metodológica robusta que nos permita comprender a fondo las dimensiones del problema antes de intentar resolverlo. Esta pausa diagnóstica es vital; evita que el entusiasmo por el desarrollo tecnológico se adelante a las verdaderas necesidades de los usuarios, reduciendo el riesgo de crear un comunicador técnicamente impecable, pero inútil para la vida cotidiana de las familias.

El comportamiento diferencial de las dimensiones durante el juicio experto aporta información valiosa. Las dimensiones vinculadas con necesidades, diseño e intención de beneficio fueron mejor valoradas, probablemente porque representan contenidos más directamente observables o deseables dentro de un instrumento de diagnóstico. En cambio, el bloque de barreras fue más complejo porque combina factores personales, familiares, escolares, económicos y tecnológicos. La menor concordancia del panel sugiere que las barreras de adopción no deben abordarse como una lista genérica, sino como un dominio sensible al contexto y susceptible de modificarse según el entorno de uso.

La mejora posterior de la confiabilidad en Barreras muestra que el proceso de depuración fue pertinente. El bloque pasó de ser el área con menor desempeño en validez de contenido a presentar una consistencia interna alta en la aplicación piloto. Esta transición es relevante porque evidencia la utilidad del juicio experto no solo como filtro de eliminación, sino como mecanismo de refinamiento conceptual. En otras palabras, los reactivos con menor consenso no necesariamente deben ser eliminados de forma automática; algunos pueden contener información valiosa si se reformulan con mayor precisión.

La dimensión de Preferencias obtuvo el alfa más bajo entre las dimensiones aplicadas, pero este resultado no debe interpretarse como debilidad severa. Las preferencias de uso de un apoyo

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

comunicativo pueden estar influenciadas por múltiples variables: familiaridad con pictogramas, experiencias previas con tableros, aceptación de dispositivos electrónicos, sensibilidad táctil o visual, facilidad de transporte, lenguaje utilizado en casa y grado de participación escolar. En ese sentido, cierta heterogeneidad es esperable e incluso deseable, pues un instrumento de diseño debe captar variedad de necesidades y no forzar artificialmente una única preferencia de uso.

En contraste, los valores altos en Necesidades y Expectativas confirman que las personas cuidadoras tienden a reconocer de manera consistente la relevancia de contar con medios de comunicación más claros y accesibles. No obstante, cuando las expectativas se concentran en niveles muy altos, el instrumento puede perder capacidad para diferenciar prioridades. Por ello, una mejora futura sería incluir reactivos de priorización o escenarios de decisión, por ejemplo: elegir entre portabilidad, costo, personalización, salida de voz, pictogramas, uso sin internet o facilidad de limpieza. Este tipo de reactivos puede complementar la escala Likert y facilitar la traducción de resultados en requerimientos de diseño.

3.2 Implicaciones para el diseño de una solución comunicativa

Aunque este artículo no evalúa un prototipo, los resultados sí permiten formular implicaciones iniciales para el diseño posterior del comunicador. La principal aportación del INCA-O es que convierte las necesidades reportadas por cuidadores en criterios observables para el desarrollo de una solución. Esta traducción es fundamental en proyectos de tecnología asistiva, porque el éxito no depende únicamente de que el sistema funcione, sino de que pueda integrarse a rutinas reales, sea comprendido por la familia, sea aceptado por escuelas y terapeutas, y no genere una carga adicional difícil de sostener.

Tabla 3.

Traducción preliminar de dimensiones del INCA-O a requerimientos de diseño

Necesidades	Integrar un vocabulario altamente funcional y centrado en la persona (pedir ayuda, expresar molestias, elegir o rechazar), evitando limitarse solo a necesidades básicas e incluyendo herramientas para la gestión de emociones y la participación en rutinas.
Preferencias	Garantizar opciones de personalización visual (como alternar entre pictogramas y fotografías reales), adaptarse a distintos niveles de complejidad cognitiva y ofrecer la libertad de activar o desactivar la salida de voz según el usuario.
Barreras	Priorizar un desarrollo de bajo costo y uso intuitivo que requiera una curva de aprendizaje mínima (capacitación breve), que fomente la aceptación en el entorno escolar y que funcione de manera autónoma, sin depender permanentemente de una conexión a internet.
Condiciones	Optimizar el sistema para su uso en dispositivos comunes (celulares o tabletas), asegurando características prácticas como alta portabilidad, resistencia física, facilidad de limpieza y adaptabilidad a los tiempos y dinámicas de cada familia.
Expectativas	Apuntar hacia un diseño que reduzca la frustración diaria, promueva activamente la autonomía del usuario y facilite una comunicación fluida y constante entre los ecosistemas vitales de la persona: la casa, la escuela y la terapia.

La tabla anterior no constituye todavía una especificación técnica definitiva; funciona como una guía de transición entre el diagnóstico instrumental y el desarrollo tecnológico. En la siguiente fase será necesario profundizar en el peso relativo de cada dimensión, analizar relaciones entre constructos y contrastar los requerimientos derivados del instrumento con pruebas de uso real. Sin embargo, ya permite delimitar una premisa de diseño: la solución debe ser de bajo costo, adaptable, comprensible para cuidadores, funcional en distintos contextos y suficientemente flexible para incorporar expresiones comunicativas más allá de la solicitud de objetos.

Otro punto relevante es que el instrumento puede apoyar decisiones diferenciadas. Por ejemplo, una familia con alta necesidad comunicativa y bajas condiciones de acceso requeriría una solución más robusta en formato físico o híbrido; una familia con alta disponibilidad tecnológica pero muchas barreras escolares requeriría estrategias de implementación institucional; una persona con alta sensibilidad sensorial podría necesitar un tablero menos saturado visualmente o un dispositivo con baja demanda táctil. Esta capacidad de segmentar perfiles de necesidad abre la posibilidad de que el INCA-O no solo mida, sino que oriente rutas de intervención y prototipado.

3.3 Relevancia social y educativa del instrumento

El desarrollo de un instrumento como el INCA-O tiene relevancia social porque permite documentar necesidades que con frecuencia quedan dispersas en narrativas familiares, reportes terapéuticos o experiencias escolares aisladas. Cuando estas necesidades no se sistematizan, resulta difícil argumentar la pertinencia de apoyos, justificar ajustes razonables o diseñar materiales acordes con las condiciones reales de uso. La escala propuesta contribuye a transformar esas experiencias en información organizada, comparable y susceptible de análisis, sin perder de vista que detrás de cada respuesta existe una situación familiar concreta.

En el ámbito educativo, el instrumento puede servir como punto de partida para identificar barreras de participación. La escuela suele ser uno de los espacios donde más se evidencian las dificultades comunicativas, no solo porque exige interacción con docentes y pares, sino porque introduce rutinas, normas, transiciones y demandas sensoriales distintas a las del hogar. Un cuestionario dirigido a personas cuidadoras puede aportar información útil para orientar conversaciones con docentes, terapeutas y personal de apoyo, especialmente cuando no existe un diagnóstico comunicativo actualizado o cuando la familia percibe que las necesidades del niño o niña no están siendo plenamente comprendidas.

La utilidad educativa del INCA-O no debe entenderse como sustitución de evaluaciones clínicas o psicopedagógicas. Su función es complementaria: ordenar información inicial, detectar prioridades, hacer visibles condiciones de acceso y ofrecer una base para tomar decisiones. En contextos con recursos limitados,

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

este tipo de herramientas puede ayudar a seleccionar estrategias realistas antes de invertir en dispositivos costosos o programas que quizá no se ajusten a las rutinas familiares. También puede favorecer que el diseño de apoyos no se concentre exclusivamente en el desempeño individual, sino en la modificación del entorno para ampliar oportunidades de comunicación.

Otro aporte social del instrumento es que reconoce a las personas cuidadoras como fuentes válidas de conocimiento situado. En muchas investigaciones sobre tecnología asistiva, la familia aparece únicamente como usuaria secundaria o como facilitadora de la intervención. En este proyecto, en cambio, su perspectiva se considera un insumo central para comprender el problema de diseño. Esta decisión no elimina la necesidad de incluir progresivamente a las personas usuarias directas, pero sí reconoce que, cuando existen necesidades complejas de comunicación, el conocimiento acumulado por quienes acompañan la vida cotidiana resulta indispensable para construir apoyos pertinentes.

3.4 Aporte interdisciplinario del estudio

El INCA-O se ubica en una zona de convergencia entre educación, comunicación, tecnología asistiva, diseño centrado en el usuario y análisis psicométrico. Esta convergencia es una de sus fortalezas, pero también uno de sus retos. Desde el campo educativo, el instrumento busca comprender cómo se expresa la necesidad de participación y aprendizaje. La comunicación aumentativa y alternativa se enfoca en las formas funcionales de expresión y en la selección de apoyos. Desde la ingeniería y el desarrollo tecnológico, aporta información para transformar necesidades en requerimientos. La metodología de investigación exige validar sus dimensiones antes de utilizar sus resultados para tomar decisiones de diseño.

Esta articulación interdisciplinaria es especialmente importante porque los problemas de comunicación en autismo no hablante no se resuelven únicamente con tecnología. Una aplicación puede tener buen diseño visual, pero fracasar si no considera la capacitación de la familia. Un tablero puede ser económico, pero poco útil si no incluye vocabulario relevante. Un dispositivo con salida de voz puede ser atractivo, pero inviable si depende de conectividad permanente o si la escuela restringe su uso. Por ello, la validación del instrumento no debe verse como un trámite previo, sino como una etapa estratégica para evitar soluciones descontextualizadas.

El estudio también aporta una ruta metodológica replicable para otros proyectos de tecnología asistiva desarrollados en instituciones de educación superior. Antes de construir un prototipo, se propone delimitar el problema, revisar literatura, elaborar dimensiones, validar contenido con expertos, aplicar una prueba piloto y analizar consistencia interna. Esta secuencia puede adaptarse a otros apoyos educativos o comunicativos, especialmente cuando los recursos son limitados y se requiere justificar la pertinencia del desarrollo tecnológico ante comunidades, instituciones o convocatorias de investigación aplicada.

En conclusión, el trabajo fortalece la relación entre investigación académica y desarrollo con sentido social. El producto inmediato no es todavía un comunicador, sino un instrumento que permite diseñarlo mejor. Esta distinción es importante: en proyectos de innovación, suele existir presión por mostrar rápidamente un prototipo visible; sin embargo, una tecnología asistiva mal orientada puede aumentar la frustración de las familias o convertirse en un recurso abandonado. La validación del INCA-O ayuda a sostener una ruta más cuidadosa, donde la solución tecnológica se construya a partir de evidencia, escucha situada y revisión crítica de las condiciones reales de uso.

3.5 Limitaciones del estudio

Como estudio preliminar, esta investigación presenta limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, la muestra piloto fue reducida y no probabilística, por lo que los coeficientes de confiabilidad deben entenderse como evidencia inicial y no como confirmación definitiva de la estructura del instrumento. En segundo lugar, la información proviene del reporte de personas cuidadoras, lo cual aporta riqueza contextual, pero también puede estar influida por expectativas, experiencias previas, nivel de conocimiento sobre CAA y carga cotidiana de cuidado.

En tercer lugar, algunos dominios mostraron señales de posible redundancia o efecto de techo. Esto no invalida el instrumento, pero indica la necesidad de revisar la sensibilidad de ciertos reactivos antes de su aplicación ampliada. En última instancia, este estudio no incluye todavía análisis factorial confirmatorio, invariancia de medición, validez convergente ni pruebas de desempeño del futuro comunicador. Dichos análisis corresponden a fases posteriores y serán necesarios para sostener inferencias más robustas sobre la estructura latente del INCA-O y su utilidad predictiva para el diseño tecnológico.

3.6 Trabajo futuro

La siguiente etapa del proyecto contempla ampliar la muestra de personas cuidadoras para contar con una base suficiente que permita análisis factorial confirmatorio y modelado de ecuaciones estructurales. Con una muestra mayor será posible evaluar la estabilidad de las dimensiones, estimar cargas factoriales, identificar correlaciones entre constructos y analizar qué dimensiones explican mejor la expectativa de uso o la intención de adopción de un comunicador. También será pertinente comparar perfiles de cuidadores según edad del niño o niña, contexto escolar, experiencia previa con CAA, acceso tecnológico y región de residencia.

Posteriormente, los resultados deberán integrarse a un ciclo de diseño centrado en el usuario. Esto implica construir prototipos de baja y mediana fidelidad, probarlos con familias y profesionales, documentar barreras de uso y ajustar tanto el sistema como el instrumento. En esa fase, el INCA-O puede funcionar como herramienta diagnóstica inicial y como insumo para definir requerimientos, priorizar funcionalidades y justificar decisiones de diseño ante criterios de pertinencia social, accesibilidad y viabilidad tecnológica.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID088

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

3.7 Ruta analítica para la muestra ampliada

En la muestra ampliada se recomienda evaluar primero la estructura de medición mediante análisis factorial confirmatorio. Este paso permitirá determinar si los reactivos se agrupan de manera coherente en las dimensiones propuestas y si los indicadores presentan cargas factoriales adecuadas. También será necesario revisar índices de ajuste global, confiabilidad compuesta y varianza extraída promedio cuando el tamaño muestral lo permita. Estos análisis permitirán decidir si el instrumento debe conservar su estructura de cinco dimensiones o si alguna dimensión requiere subdividirse, integrarse o depurarse.

Una vez estabilizada la estructura de medición, el modelado de ecuaciones estructurales puede utilizarse para explorar relaciones entre necesidades, barreras, condiciones, preferencias y expectativas. Por ejemplo, podría analizarse si las condiciones de acceso moderan la relación entre necesidades comunicativas y expectativa de utilidad, o si las barreras percibidas reducen la intención de adopción de una herramienta. Estos modelos no deben entenderse como predicción clínica, sino como una estrategia de investigación aplicada para priorizar decisiones de diseño y orientar la fase tecnológica del proyecto.

Otra posibilidad analítica es la segmentación de perfiles. Con una muestra suficiente, los puntajes dimensionales del INCA-O podrían utilizarse para identificar grupos de familias con necesidades semejantes: alta necesidad y bajo acceso, alta expectativa pero alta barrera escolar, preferencia por recursos físicos, preferencia por recursos digitales o perfiles mixtos. Esta información permitiría diseñar versiones diferenciadas del comunicador, materiales de capacitación específicos y rutas de implementación más realistas para familias, escuelas y terapeutas.

IV. CONCLUSIONES

El diseño y la validación preliminar del INCA-O demuestran que es posible estructurar una herramienta confiable para escuchar y atender las necesidades comunicativas de la niñez autista no hablante. Gracias al juicio de expertos, logramos afinar el enfoque del cuestionario en particular, repensando cómo evaluamos las barreras del entorno y confirmando su alta consistencia interna durante la prueba piloto. Aunque estamos ante una versión inicial que requerirá validaciones psicométricas con muestras más amplias, los índices obtenidos aportan evidencia preliminar favorable sobre la consistencia interna del instrumento. Al mismo tiempo, los valores extremadamente altos en algunas dimensiones sugieren la conveniencia de revisar posibles redundancias y mejorar la capacidad discriminante de ciertos reactivos antes de su uso en muestras amplias.

El principal aporte del INCA-O no es únicamente descriptivo. Su valor radica en que permite recuperar la perspectiva de personas cuidadoras y traducirla en información útil para el diseño de soluciones de CAA con pertinencia contextual. En consecuencia, el instrumento puede funcionar como puente entre investigación aplicada, diagnóstico de necesidades y desarrollo tecnológico. Esta articulación resulta clave para evitar soluciones asistidas diseñadas desde supuestos generales y avanzar hacia apoyos comunicativos accesibles, sostenibles y sensibles a las condiciones reales de uso.

Finalmente, este trabajo cumple con la función esperada para la primera etapa del proyecto: establecer una base conceptual y empírica suficiente para justificar el desarrollo posterior de un comunicador, sin anticipar conclusiones definitivas sobre su eficacia tecnológica. Las etapas siguientes deberán ampliar la muestra, confirmar la estructura factorial, analizar relaciones entre dimensiones y someter los requerimientos derivados del INCA-O a pruebas de diseño, usabilidad y validación en contextos reales.

V. AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen la participación de madres, padres y personas cuidadoras de niñas y niños autistas que respondieron al instrumento en su fase piloto, así como el apoyo del panel de personas expertas vinculadas con educación especial, terapia ocupacional, comunicación/lenguaje y experiencia familiar o asociativa. Su colaboración permitió mejorar la claridad, pertinencia y sensibilidad del instrumento.

Agradecemos también al TecNM/Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por las facilidades brindadas para la realización de esta investigación.

VI. REFERENCIAS

Alonso Alonso, C. A. (2025). *Diseño y validación de un tablero de comunicación para la consulta de enfermería* [Trabajo de fin de grado, Universidad de La Laguna]. RIULL.

American Speech-Language-Hearing Association. (2022). *Augmentative and alternative communication*.

Canal Laitón, C. (2024). *Diseño de un tablero de comunicación aumentativa alternativa CAA para facilitar los procesos de comunicación e interacción de los niños con autismo en el aula* [Tesis de maestría, Universidad de La Sabana].

Cantos Vilaplana, C. (2022). *Guía informativa sobre el uso del sistema aumentativo y alternativo de comunicación Proloquo2Go para familiares y/o cuidadores* [Trabajo de fin de grado, Universidad Miguel Hernández].

Flórez Villada, T. V. (2024). *Los lenguajes expresivos y el autismo: El arte como camino hacia el aprendizaje* [Trabajo de grado, Corporación Universitaria Lasallista].

Koegel, L. K., Bryan, K. M., Su, P. L., Vaidya, M., y Camarata, S. (2020). Definitions of nonverbal and minimally verbal in research for autism: A systematic review of the literature. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 50*(8), 2957–2972.

Orozco Greenwell, I., Maya Rivero, A., y Romero Becerril, J. C. (2025). ¿Cómo diseñar para quienes no pueden hablar, pero necesitan ser escuchados? Diseño de una herramienta digital de comunicación aumentativa y

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

alternativa para personas adultas con autismo no verbal en México. *MXRIO 2025 Design Conference*.

Perichon, J. (2025). A scoping review of the observed and perceived functional impacts associated with language and learning disorders. *International Journal of Language & Communication Disorders*.

Plate, S. (2025). The state of natural language sampling in autism research: A scoping review. *Autism & Developmental Language Impairments*.

Posar, A., y Visconti, P. (2022). Update about “minimally verbal” children with autism spectrum disorder. *Revista Paulista de Pediatria, 40*.

Sazo Ávila, J. A., Díaz Quilaqueo, E., y Álvarez Montesinos, K. (2024). “Es su voz”: Percepciones de cuidadores chilenas sobre comunicación aumentativa alternativa en intervención fonoaudiológica de niños autistas preescolares. *Revista Educación las Américas, 1*(4064), 27–41.

Ugarte Niola, I. M. (2024). *Tecnologías aumentativas y alternativas para el desarrollo de habilidades comunicativas en niños con autismo en preescolar* [Proyecto de titulación, Universidad Católica de Cuenca].

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización [Conceptualization]	Valenzuela Martínez, Patricia Abigail
2	Curación de datos [Data curation]	Valenzuela Martínez, Patricia Abigail
3	Análisis formal [Formal analysis]	Valenzuela Martínez, Patricia Abigail
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Rodriguez Chacon, Rocio Lorena
5	Investigación [Investigation]	Valenzuela Martínez, Patricia Abigail
6	Metodología [Methodology]	Valenzuela Martínez, Patricia Abigail
7	Administración del proyecto [Project administration]	Rodriguez Chacon, Rocio Lorena
8	Recursos [Resources]	Rodriguez Chacon, Rocio Lorena
9	Software [Software]	Valenzuela Martínez, Patricia Abigail
10	Supervisión [Supervision]	Rodriguez Chacon, Rocio Lorena
11	Validación [Validation]	Rodriguez Chacon, Rocio Lorena
12	Visualización [Visualization]	Valenzuela Martínez, Patricia Abigail
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Valenzuela Martínez, Patricia Abigail
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Valenzuela Martínez, Patricia Abigail; Rodriguez Chacon, Rocio Lorena

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID088

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Evaluación de la Severidad de Fallas y su Acoplamiento con la Dinámica Postfalla para la Priorización de Generadores Críticos en Estudios de Estabilidad Transitoria

Evaluation of Fault Severity and its Coupling with Post-Fault Dynamics for the Prioritization of Critical Generators in Transient Stability Studies

Sellschopp-Sánchez, F.S.[1]; Ruiz-Ponce, G.E.[2]; Lozano-Cuéllar, L.[3]

Datos de Adscripción:

[1] Sellschopp Sánchez, Francisco Sergio
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de La Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Posgrado en Ingeniería Eléctrica, Torreón, Coahuila, México, C.P. 27000.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/00xbw4a70
fsellschopps@correo.itlalaguna.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3516-352

[2] Ruiz Ponce, Gerardo Enrique
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de La Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Posgrado en Ingeniería Eléctrica, Torreón, Coahuila, México, C.P. 27000.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/00xbw4a70
gruizp@correo.itlalaguna.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1423-4222

[3] Lozano Cuéllar, Leticia
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de La Laguna, Departamento de Ingeniería Eléctrica-Electrónica-Energías Renovables y Semiconductores, Torreón, Coahuila, México, C.P. 27000.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/00xbw4a70
llozanoc@correo.itlalaguna.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6471-9655

Resumen **- En este trabajo se presenta una metodología para la priorización de generadores síncronos susceptibles a condiciones críticas en sistemas eléctricos de potencia, basada en la caracterización eléctrica de la severidad de fallas y su contraste con la respuesta electromecánica en etapas tempranas del fenómeno transitorio. A diferencia de los enfoques tradicionales centrados en la desviación angular, esta metodología integra datos eléctricos tanto durante la contingencia como en el breve lapso tras el despeje. El objetivo es captar cómo la nueva topología de red —tras la desconexión de elementos— influye en el sistema, ofreciendo una lectura física que complementa, sin reemplazar, los estudios clásicos de estabilidad. Para determinar qué tan severa es la perturbación, se utilizan impedancias operacionales percibidas que dependen del estado; estas se calculan con base en escenarios de prefalla y cortocircuito para ubicar la proximidad eléctrica de cada generador respecto a la falla. Por último, la respuesta electromecánica solo sirve como marco de validación para el índice diseñado. Para ello, se evalúan variables dinámicas durante el periodo crítico, tales como la oscilación de la velocidad, el ángulo de carga y el incremento de la energía cinética. A partir de las métricas eléctricas propuestas, se construye un índice de criticidad que pondera los generadores según el grado de perturbación y prioriza las unidades para un análisis detallado posterior. La metodología se evalúa en el sistema IEEE de 39 nodos y muestra coincidencia con la respuesta dinámica observada, lo que se corresponde con la identificación de generadores críticos bajo el criterio desarrollado por EPRI.**

Palabras Clave: Estabilidad Transitoria, Fallas Eléctricas, Generadores Síncronos, Severidad de Fallas, Sistemas Eléctricos de Potencia.

Abstract **- This paper presents a methodology for prioritizing synchronous generators susceptible to critical conditions in electric power systems, based on the electrical characterization of fault severity and its contrast with the electromechanical response during the early stages of transient phenomena. Unlike traditional approaches focused on angular deviation, this methodology integrates electrical data both during the contingency and in the brief period following fault clearing. The objective is to capture how the new network topology—resulting from the disconnection of elements—influences the system, providing a physical interpretation that complements, rather than replaces, classical stability studies. To determine the severity of the disturbance, state-dependent perceived operational impedances are used; these are calculated from pre-fault and short-circuit scenarios to locate each generator's electrical proximity to the fault point. Finally, the electromechanical response serves only as a validation framework for the proposed index. To this end, dynamic variables are evaluated during the critical period, such as speed oscillation, load angle, and incremental kinetic energy. Based on the proposed electrical metrics, a criticality index is constructed to weight generators by disturbance severity and prioritize units for subsequent detailed analysis. The methodology is evaluated on the IEEE 39-bus system, demonstrating consistency with the observed dynamic response and aligning with the identification of critical generators under EPRI-developed criteria.**

Keywords: Electrical Faults, Fault Severity, Power Systems, Synchronous Generators, Transient Stability.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID101

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

I. INTRODUCCIÓN

La estabilidad transitoria en sistemas eléctricos de potencia (SEP) constituye un aspecto fundamental para garantizar la operación segura y confiable de las redes eléctricas modernas, particularmente ante el incremento de la penetración de fuentes renovables no convencionales, que reducen la inercia electromecánica del sistema (Machowski et al., 2020). El crecimiento constante y la interconexión creciente de las redes eléctricas han vuelto mucho más complejo el análisis de su comportamiento, tanto en operación normal como en regímenes transitorios. Esto es especialmente crítico ante grandes perturbaciones, como cortocircuitos, caídas de generación o la pérdida de enlaces entre áreas. En este escenario, el estudio de la estabilidad transitoria es hoy un pilar fundamental para garantizar que el suministro eléctrico sea continuo y seguro (Kundur, 1994). Cuando ocurre una falla severa, la dinámica electromecánica de los generadores síncronos —sobre todo la interacción oscilatoria entre sus rotores— define el comportamiento global y no lineal de la red. Por ello, seguir la evolución de variables como el ángulo de carga y la velocidad del rotor es vital para comprender la respuesta del sistema y detectar una posible pérdida de sincronismo (Eremia et al., 2013).

Evaluar la estabilidad transitoria en sistemas multimáquina es, a nivel computacional, un reto exigente, más aún si se busca una aplicación en tiempo real en centros de control (Savulescu, 2009). Una alternativa común para simplificar este problema es el modelo de máquina única contra bus infinito (OMIB). Este enfoque permite representar el sistema mediante agregaciones de generadores y aplicar criterios de estabilidad más sencillos, como el de áreas iguales (Pavella et al., 2000; Sauer et al., 2017). Sin embargo, la efectividad del OMIB depende por completo de que los grupos coherentes y no coherentes de generadores se formen correctamente. En términos prácticos, los generadores coherentes oscilan de forma similar en sus variables angulares durante la falla, mientras que los no coherentes muestran respuestas dinámicas muy distintas o sufren un impacto mucho más severo. Así, identificar con precisión qué máquinas son críticas y cuáles no se vuelve el eje central para construir equivalentes dinámicos y evaluar la estabilidad (Lee & Schweppe, 1973; Podmore, 1979; Juárez et al., 2011; Agrawal & Thukaram, 2011).

Tradicionalmente, este análisis se ha apoyado en la evolución temporal de variables como el ángulo y la velocidad del rotor, además de métodos energéticos (Anderson et al., 2003; Pavella et al., 2000). El inconveniente es que estos enfoques suelen separar la caracterización eléctrica inicial de la falla de la respuesta dinámica posterior, lo que dificulta detectar de antemano qué generadores son los más vulnerables. Por su parte, el análisis de cortocircuito ofrece datos valiosos sobre la severidad eléctrica —como niveles de corriente y caídas de tensión—, pero rara vez se integra de forma sistemática con el estudio dinámico. Esto provoca que se desaproveche información clave para una evaluación temprana de la criticidad.

En este trabajo se plantea una metodología que une explícitamente métricas eléctricas estáticas y dinámicas para facilitar la clasificación de generadores en el modelo OMIB. La propuesta busca una correspondencia física directa con la severidad de la falla mediante variables derivadas del análisis de cortocircuito. Específicamente, se introduce la idea de la "impedancia operacional percibida" de cada generador durante el evento. Al descomponer sus partes resistiva y reactiva, y analizar las relaciones incrementales de tensión y corriente, es posible cuantificar el acoplamiento electromagnético en condiciones transitorias. A partir de aquí, se derivan índices que detectan de forma precoz las unidades más vulnerables y su papel en la pérdida de sincronismo. Esto no solo ayuda a formar grupos coherentes para modelos OMIB, sino que también permite una validación cruzada entre las métricas eléctricas y el comportamiento electromecánico real.

Finalmente, la metodología propuesta permite una evaluación continua del fenómeno de estabilidad transitoria a lo largo de tres etapas: pre-falla, durante la falla y un intervalo post-falla, considerando así los efectos de la reconfiguración topológica del sistema. Como resultado de este análisis integrado, se deriva el índice de criticidad IC_k, el cual constituye la aportación central de este trabajo. Dicho índice sintetiza métricas fasoriales eléctricas de las tres etapas y permite priorizar, de manera temprana y con bajo costo computacional, a los generadores más vulnerables, complementando los enfoques tradicionales basados en variables electromecánicas.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

La metodología propuesta se desarrolla mediante una descomposición temporal del fenómeno de falla en el sistema eléctrico, empleando métricas eléctricas para construir el índice de criticidad y variables electromecánicas para validar la respuesta dinámica del sistema.

2.1 Análisis estático del cortocircuito (condición pre-falla)

El estudio de cortocircuito trifásico balanceado en redes eléctricas constituye una herramienta fundamental para caracterizar el comportamiento extremo de los sistemas eléctricos de potencia, ya que permite establecer condiciones límite a partir de las cuales se pueden derivar propiedades eléctricas operacionales del sistema (Glover et al., 2016). La falla trifásica balanceada posibilita el uso de modelos monofásicos equivalentes sin pérdida de generalidad mediante las componentes simétricas, lo que simplifica el tratamiento analítico y mantiene la fidelidad del fenómeno físico (Saadat, 1999). En este contexto, cuando ocurre una falla trifásica sólida en un nodo específico del sistema, el voltaje en dicho nodo *j* colapsa prácticamente a cero, lo que se expresa como en (1):

$$V_j^{falla} \approx 0 \tag{1}$$

Esto provoca un aumento de la corriente, cuya magnitud depende de la impedancia equivalente del sistema vista desde el punto de falla. Esta relación de corriente puede formalizarse mediante la expresión (2):

$$I_j^{falla} = \frac{V_j^{pre}}{Zth_j} \tag{2}$$

Donde V_j^{pre} representa el voltaje prefalla y Zth_j la impedancia de Thévenin equivalente vista desde el nodo *j*.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID101

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Debe aclararse que la impedancia de Thévenin utilizada para el cálculo de cortocircuito corresponde a una representación equivalente de la red vista desde el punto de falla, mientras que las impedancias definidas posteriormente mediante la relación tensión-corriente de cada generador corresponden a impedancias operacionales aparentes dependientes del estado del sistema. Por lo que a partir de esta consideración, es posible obtener un conjunto de variables eléctricas fundamentales, tales como las corrientes de contribución de cada generador, las caídas de tensión en los nodos, y las redistribuciones de potencia activa y reactiva, las cuales constituyen la base para definir métricas fasoriales complejas que permitan cuantificar el impacto de la perturbación sobre el sistema.

Desde la perspectiva de los generadores síncronos en un sistema eléctrico multimáquina, la falla no se percibe de manera uniforme, sino que su impacto depende de la localización eléctrica relativa entre cada máquina y el punto de falla, así como de las características internas de cada generador, particularmente de sus parámetros de impedancia interna (Krause et al., 2013). En condiciones prefalla, cada generador *k* opera en un estado de equilibrio definido por sus variables de voltaje y corriente, lo que permite definir una impedancia operacional aparente dada por:

$$Zg_k^{pre} = \frac{V_k^{pre}}{I_k^{pre}} \tag{3}$$

Sin embargo, durante la falla, la caída abrupta de voltaje y el incremento en las corrientes de contribución modifican significativamente esta relación, dando lugar a una nueva impedancia operacional aparente dependiente de la condición de falla (4):

$$Zg_k^{falla} = \frac{V_k^{falla}}{I_k^{falla}} \tag{4}$$

Este cambio no solo refleja la severidad de la perturbación, sino también la interacción entre la máquina y la red, convirtiéndose en una magnitud representativa del nivel de acoplamiento eléctrico. En este sentido, la impedancia operacional aparente debe interpretarse como una variable dependiente del estado del sistema, más que como un parámetro intrínseco del generador.

Con base en estas definiciones, es posible establecer un conjunto de métricas fasoriales complejas que cuantifican los cambios inducidos por la falla, las cuales resultan esenciales para identificar patrones de comportamiento diferencial entre generadores. Se define la diferencia de voltajes (5) y corrientes (6) de prefalla y falla que se presentan en los generadores de la siguiente manera:

$$\Delta V_k = V_k^{pre} - V_k^{falla} \tag{5}$$

$$\Delta I_k = I_k^{falla} - I_k^{pre} \tag{6}$$

Donde el indicador ΔV se denota como la depresión de voltaje en generador *k*, y ΔI es el incremento de la corriente en generador *k*.

Se puede manipular algebraicamente la impedancia operacional de falla que percibe el generador de la siguiente manera:

$$Zg_k^{falla} = \frac{V_k^{pre} - \Delta V_k}{I_k^{pre} + \Delta I_k} = \frac{1}{\frac{1}{Zg_k^{pre}} + \frac{\Delta I_k}{V_k^{pre}}} - \frac{\Delta V_k}{I_k^{falla}} \tag{7}$$

Por tanto, a partir de la descomposición de la impedancia operacional de falla (7) y los indicadores de depresión de tensión e incremento de corriente se extraen las siguientes métricas fasoriales complejas de sensibilidad de tensión *Svi* y de corriente *Siv*, ecs. (8) y (9) respectivamente:

$$Svi_k = \frac{\Delta V_k}{I_k^{falla}} \tag{8}$$

$$Siv_k = \frac{\Delta I_k}{V_k^{pre}} \tag{9}$$

De la misma manera se definen métricas fasoriales complejas de impacto en las diferencias de tensión *Dv* y corriente *Di*, ecs. (10) y (11) respectivamente:

$$Dv_k = \frac{\Delta V_k}{V_k^{pre}} \tag{10}$$

$$Di_k = \frac{\Delta I_k}{I_k^{pre}} \tag{11}$$

Estas 4 métricas fasoriales complejas, en conjunto, proporcionan, en diferentes medidas, una caracterización estática del impacto de la falla, indispensable como punto de partida para el análisis dinámico.

2.2 Análisis dinámico durante el cortocircuito (etapa de falla)

Durante el intervalo en el cual la falla permanece activa, el sistema entra en un régimen dinámico dominado por la interacción entre las variables mecánicas y eléctricas de los generadores. Este comportamiento se describe mediante la ecuación de oscilación, la cual establece el balance entre la potencia mecánica de entrada y la potencia eléctrica de salida, determinando la aceleración angular del rotor, la desviación de velocidad y la potencia eléctrica (Kundur, 1994; Machowski et al., 2020), expresadas como:

$$M_k \frac{d^2\delta_k}{dt^2} = Pa_k = Pm_k - Pe_k \tag{12}$$

$$\frac{d\delta_k}{dt} = \omega_k - \omega_0 = \Delta\omega_k \tag{13}$$

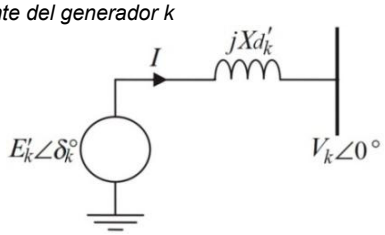
$$Pe_k = \frac{E\prime_k V_k}{Xd\prime_k} sin(\delta_k) \tag{14}$$

donde *M* es la constante de inercia del generador *k*, δ es el ángulo de carga, *Pa* es la potencia de aceleración definida como la diferencia entre la potencia mecánica *Pm* y la potencia eléctrica, *Pe*, ω_0 es la velocidad síncrona dada por la frecuencia del sistema eléctrico, $\omega_k$es la velocidad angular del rotor del generador *k* y $\Delta\omega$ representa la desviación de velocidad respecto a la condición síncrona. Así mismo, a partir del circuito equivalente del generador, Figura 1, se tiene que *E'* corresponde a la tensión interna del generador, *V* a la tensión en sus terminales, *I* a la corriente que suministra y *Xd'* a la reactancia transitoria del generador.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID101

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 1
Circuito equivalente del generador k

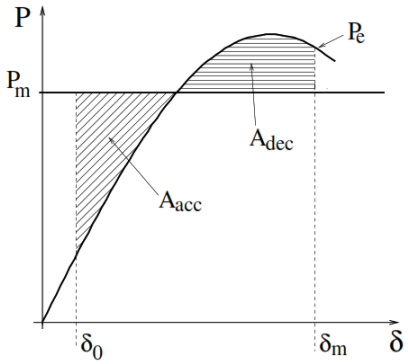


Al presentarse una falla en algún nodo de la red eléctrica, la caída abrupta del voltaje —aun cuando se produzca un incremento en la corriente de salida del generador— conduce, en términos generales, a una disminución significativa de la potencia eléctrica entregada. Como consecuencia, se origina una potencia de aceleración positiva, dado que *Pm*, impuesta por la turbina, permanece prácticamente constante durante los primeros instantes de la perturbación (Kundur, 1994), este desequilibrio provoca una aceleración del rotor, siendo más pronunciada en aquellos generadores eléctricamente más cercanos al punto de falla. Este fenómeno puede analizarse mediante el criterio de áreas iguales, (Figura 2, el cual permite interpretar el balance energético entre las fases de aceleración y desaceleración del sistema.
En este contexto, durante la falla, una potencia de aceleración positiva incrementa la velocidad angular del rotor y, en consecuencia, la desviación progresiva del ángulo de carga. Este mecanismo constituye el proceso fundamental que puede conducir a la pérdida de sincronismo si, tras el despeje de la falla, no se restablece el equilibrio entre la potencia mecánica de entrada y la potencia eléctrica de salida.
En este intervalo, las principales variables electromecánicas perturbadas evolucionan de la siguiente manera:

$$\Delta\delta_k(t) = \delta_k(t) - \delta_k^{pre} \tag{15}$$

$$\Delta\omega_k(t) = \omega_k(t) - \omega_k^{pre} \tag{16}$$

Figura 2.
Criterio de Áreas Iguales con áreas de aceleración (Aacc) y desaceleración (Adec)



Desde una perspectiva energética, la potencia de aceleración durante la falla se convierte en incremento de la energía cinética que se almacena en la masa rotativa del generador (17), la cual puede expresarse como:

$$Ec_k(t) = 0.5 J_k \omega_k^2(t) \tag{17}$$

Donde *J* representa el momento de inercia del rotor.
La evolución de esta energía permite interpretar físicamente el comportamiento dinámico del sistema durante la falla, como la energía acumulada (18), la desviación angular máxima y la desviación de velocidad.

$$\Delta Ec_k = \int_0^{tfalla} Pa_k \, dt \tag{18}$$

Estas magnitudes permiten evaluar no solo la severidad instantánea de la perturbación, sino también su efecto acumulativo, el cual resulta determinante para la estabilidad del sistema (Kundur, 1994, Machowski et al., 2020).
En este mismo sentido, se propone incorporar explícitamente el comportamiento dinámico de las tensiones y corrientes con el objetivo de mostrar las métricas fasoriales complejas previamente definidas para el análisis de cortocircuito en estado estacionario (ecs. 5–11). De esta manera, la evolución de la estabilidad transitoria de tensión cobra un papel fundamental en la valoración integral del desempeño del sistema eléctrico ante perturbaciones severas (Machowski et al., 2020). Por tanto, se plantea la formulación de indicadores dinámicos que capturen de manera integral las variaciones instantáneas de corriente y voltaje, permitiendo así caracterizar la evolución durante todo el intervalo de duración de la perturbación. Estos indicadores dinámicos pueden definirse como funciones del tiempo, evaluadas a lo largo del periodo de falla, de la siguiente manera:

$$\Delta V_k(t) = V_k^{pre} - V_k(t) \tag{19}$$

$$\Delta I_k(t) = I_k(t) - I_k^{pre} \tag{20}$$

$$Svi_k(t) = \frac{\Delta V_k(t)}{I_k(t)} \tag{21}$$

$$Siv_k(t) = \frac{\Delta I_k(t)}{V_k^{pre}} \tag{22}$$

$$Dv_k(t) = \frac{\Delta V_k(t)}{V_k^{pre}} \tag{23}$$

$$Di_k(t) = \frac{\Delta I_k(t)}{I_k^{pre}} \tag{24}$$

La impedancia operacional de falla (25) que percibe el generador se puede calcular de la siguiente manera:

$$Zg_k(t) = \frac{V_k(t)}{I_k(t)} \tag{25}$$

El cambio relativo de la impedancia operacional percibida por un generador (26) se determina como:

$$\Delta Zg_k(t) = \frac{Zg_k(t) - Zg_k^{pre}}{Zg_k^{pre}} \tag{26}$$

Con la finalidad de cuantificar el impacto de la falla a partir de las métricas fasoriales complejas dinámicas instantáneas dependientes del tiempo, se considera su evolución en el intervalo *t=0* hasta la liberación de la falla en $t=t_{falla}$. Este tratamiento permite representar la respuesta temporal a las perturbaciones en cada generador. No obstante, para caracterizar de forma más robusta la severidad de dichas perturbaciones, se adopta el concepto de cálculo de la energía de señales (Oppenheim et al., 1997), el cual permite evaluar la

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID101

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

intensidad acumulada sin efectos de cancelación algebraica y con mayor sensibilidad a variaciones de magnitud.
En este sentido, la severidad dinámica de cada métrica fasorial compleja se define mediante su energía asociada en el intervalo de análisis, dados por:

$$\overline{DFSvi_k} = \int_0^{t_{falla}} Svi_k(t)^2\, dt \quad (27)$$

$$\overline{DFSiv_k} = \int_0^{t_{falla}} Siv_k(t)^2\, dt \quad (28)$$

$$\overline{DFDv_k} = \int_0^{t_{falla}} Dv_k(t)^2\, dt \quad (29)$$

$$\overline{DFDi_k} = \int_0^{t_{falla}} Di_k(t)^2\, dt \quad (30)$$

Con estas ecuaciones se cuantifica la intensidad de las señales de perturbación desde una perspectiva energética, lo que proporciona una base más consistente para evaluar la severidad de la falla y correlacionarla con la respuesta electromecánica del sistema, sin incorporarla al índice de criticidad propuesto en este trabajo. En particular, esta formulación resulta más adecuada para su integración con criterios de estabilidad transitoria y para la identificación de generadores críticos en el sistema eléctrico.

2.3 Análisis dinámico post-falla (evolución transitoria del sistema)

Al liberar la falla del bus en el instante t_{falla}, el sistema eléctrico experimenta una transición hacia una nueva condición operativa caracterizada por una posible modificación de la topología de la red, originada por el disparo de elementos tales como líneas de transmisión, transformadores o unidades de generación. Esta reconfiguración produce cambios en la matriz de admitancias del sistema y, en consecuencia, altera las condiciones de acoplamiento eléctrico entre los generadores y la red. Desde el punto de vista de cada máquina síncrona, dichos cambios se reflejan en una modificación de la impedancia operacional aparente percibida, así como en una redistribución de los flujos de potencia activa y reactiva, (Glover et al., 2016).
En esta nueva condición post-falla, la impedancia aparente vista por cada generador difiere de la correspondiente al estado prefalla, lo cual puede expresarse de manera análoga a la ec. (25), pero considerando ahora las variables eléctricas asociadas a la nueva topología del sistema. Esta variación de impedancia operacional modifica la capacidad de transferencia de potencia de la red y afecta el proceso de disipación de la energía acumulada durante el intervalo de falla (Kundur, 1994, Pavella et al., 2000). En particular, cuando la red post-falla presenta una menor capacidad de transferencia debido a la desconexión de elementos críticos, la energía cinética acumulada durante el periodo de aceleración debe ser absorbida por el sistema eléctrico post-falla. Si dicha capacidad de desaceleración es insuficiente, se incrementan las desviaciones de velocidad y del ángulo de carga, lo que aumenta el riesgo de pérdida de sincronismo (Kundur, 1994; Machowski et al., 2020).
Bajo estas condiciones, la evaluación dinámica no debe limitarse únicamente al intervalo de duración de la falla, sino que debe extenderse hacia el periodo posterior al despeje, es decir, para $t>t_{falla}$. Esto permite analizar la capacidad del sistema para recuperar el equilibrio electromecánico y evaluar el comportamiento oscilatorio de los generadores durante la etapa de desaceleración.
En estudios de estabilidad transitoria angular, es común emplear criterios de agregación de máquinas para reducir el sistema multimáquina a un modelo equivalente OMIB, agrupando los generadores en conjuntos coherentes críticos y no críticos (Pavella et al., 2000). Bajo este enfoque, el comportamiento dinámico de interés se asocia principalmente a la primera oscilación electromecánica, ya que durante este periodo se define la capacidad del sistema para mantener el sincronismo. Por esta razón, la metodología propuesta en este trabajo considera un horizonte temporal de análisis posterior al despeje de la falla, con el fin de capturar los fenómenos eléctricos asociados a la primera oscilación del modelo OMIB.
Con el propósito de evaluar el comportamiento dinámico post-falla, las métricas fasoriales complejas ya definidas para tensión, corriente e impedancia operacional, ecuaciones (15)-(30), se extienden al intervalo temporal t>tfalla, lo que permite cuantificar el efecto acumulativo de la nueva condición topológica sobre cada generador. En este trabajo, el criterio para seleccionar tiempo máximo de estudio, t_{max}, puede ser obtenido con base en la primera oscilación electromecánica cuando en cualquiera de los generadores se cumpla: $d\delta_k/dt = 0$, aunque se puede extender la propuesta para que un cierto porcentaje de generadores cumpla ese criterio.

$$\overline{PFSvi_k} = \int_{t_{falla}}^{t_{max}} Svi_k(t)^2\, dt \quad (31)$$

$$\overline{PFSiv_k} = \int_{t_{falla}}^{t_{max}} Siv_k(t)^2\, dt \quad (32)$$

$$\overline{PFDv_k} = \int_{t_{falla}}^{t_{max}} Dv_k(t)^2\, dt \quad (33)$$

$$\overline{PFDi_k} = \int_{t_{falla}}^{t_{max}} Di_k(t)^2\, dt \quad (34)$$

La formulación anterior permite extender de manera consistente los indicadores derivados del análisis de cortocircuito estático a un marco dinámico que incorpora la evolución temporal de las variables eléctricas y los efectos estructurales asociados al despeje de la falla. En este sentido, la combinación de estas métricas fasoriales complejas proporciona una caracterización más completa del impacto de la perturbación, lo que permite identificar patrones de comportamiento diferencial entre generadores y facilita la evaluación de su criticidad desde una perspectiva eléctrica y electromecánica.

2.4 Análisis de métricas fasoriales complejas para la identificación de generadores críticos

Las métricas fasoriales complejas presentadas en las secciones anteriores (*Svi, Siv, Dv, Di* para el análisis estático, *DFSvi DFSiv, DFDv, DFDi* para la etapa de falla y *PFSvi, PFSiv, PFDv, PFDi* para la etapa post-falla) proporcionan información complementaria sobre la severidad eléctrica, la acumulación energética y la capacidad de disipación eléctrica de cada generador. Sin embargo, algunas de ellas (especialmente las

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID101

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

basadas en tensión) tienden a sobreestimar la criticidad de los generadores que están eléctricamente cercanos al punto de falla, pero no presentan un comportamiento dinámico inestable. Por esto último, se propone un índice multimétrico de criticidad que combina los tres grupos de métricas, incorpora un término de penalización por sobreestimación estructural y se calibra con los resultados del modelo OMIB que emplea el criterio angular de la Electric Power Research Institute (EPRI) (Pavella et al. 2000).

El índice general *IC* para el generador *k* se define como:

$$IC_k = \Phi_k^E + \Phi_k^{DF} + \Phi_k^{PF} - \eta \cdot \Phi_k^{OV} \quad (35)$$

Donde Φ es la métrica normalizada y los superíndices *E, DF* y *PF* es por la métrica Estática, Durante Falla y PostFalla, respectivamente. *OV* es un término de penalización por sobreestimación estructural y η es un factor heurístico de ponderación propuesto entre 0.2 y 0.3.

El Índice Φ_k^E integra las cuatro métricas estáticas con diferentes ponderaciones reducidas debido a su tendencia a sobreestimar:

$$\Phi_k^E = \lambda_1|Svi_k| + \lambda_2|Siv_k| + \lambda_3|Dv_k| + \lambda_4|Di_k| \quad (36)$$

El Índice Φ_k^{DF} integra las 4 métricas energéticas determinadas durante la falla, reflejando la afectación por aceleración y el desacoplamiento rotor-red. En esta métrica se asignan mayores pesos a las métricas de corriente, ya que son más discriminantes:

$$\Phi_k^{DF} = \lambda_5|DFSvi_k| + \lambda_6|DFSiv_k| + \lambda_7|DFDv_k| + \lambda_8|DFDi_k| \quad (37)$$

El Índice Φ_k^{PF} se asocia a la capacidad del generador-red eléctrica para disipar la energía acumulada tras el despeje de la falla. Estas métricas post-falla reciben ponderaciones intermedias, destacándose nuevamente las relacionadas con la corriente:

$$\Phi_k^{PF} = \lambda_9|PFSvi_k| + \lambda_{10}|PFSiv_k| + \lambda_{11}|PFDv_k| + \lambda_{12}|PFDi_k| \quad (38)$$

El índice Φ_k^{OV} es un término que penaliza a aquellos generadores que presentan alta sensibilidad estructural (bajo contenido dinámico de voltaje) pero bajas métricas de corriente dinámica:

$$\Phi_k^{OV} = \frac{|Dv_k| + |DFSvi_k|}{1 + |DFDi_k| + |DFSiv_k|} \quad (39)$$

El numerador utiliza métricas de tensión (estática y durante falla) que tienden a sobreestimar; el denominador incluye métricas de corriente dinámica que ayudan a discriminar adecuadamente la sensibilidad estructural. Un generador con alta sobreestimación tendrá un numerador grande y denominador pequeño, resultando en $\Phi_k^{OV} \gg 0$, lo que reduce IC_k a través del término $\eta \cdot \Phi_k^{OV}$.

Una vez calculado IC_k para todos los generadores, se aplican los siguientes umbrales empíricos definidos a partir de la comparación con OMIB/EPRI:

- Generador crítico: $IC_k > 0.7$
- Generador potencialmente crítico: $0.7 \geq IC_k > 0.4$
- Generador no crítico: $IC_k \leq 0.4$

2.4.1 *Justificación paramétrica y física de los coeficientes de ponderación* λ

Los coeficientes de ponderación λ del índice IC_k fueron calibrados mediante un análisis de sensibilidad heurístico, fundamentado en el análisis del fenómeno del acoplamiento eléctrico-mecánico de los generadores frente a perturbaciones severas. Para evitar la sobreestimación estructural y maximizar la selectividad del índice, los parámetros se agrupan en tres componentes del fenómeno físico, como se resume en la Tabla 1.

Tabla 1.
Clasificación y asignación de pesos paramétricos del índice IC_k

Etapas de Falla	Coeficientes de Tensión	Coeficientes de corriente	Nivel de ponderación
Estado Estable	$\lambda_1, \lambda_3 \in \{0.03, 0.07\}$	$\lambda_2, \lambda_4 \in \{0.08, 0.12\}$	Medio-Bajo
Durante Falla	$\lambda_5, \lambda_7 \in \{0.10, 0.20\}$	$\lambda_6, \lambda_8 \in \{0.30, 0.40\}$	Intermedio-Alto
Post-Falla	$\lambda_9, \lambda_{11} \in \{0.03, 0.13\}$	$\lambda_{10}, \lambda_{12} \in \{0.10, 0.20\}$	Intermedio-Bajo

La asignación de estos pesos no es arbitraria; responde a la necesidad de diferenciar la propagación espacial del disturbio de la respuesta estática de la severidad de la falla y la dinámica real de las máquinas durante y posterior a la falla. La justificación para cada etapa es la siguiente:

- Estado Estable (Nivel Medio-Bajo): Evalúa la severidad inicial del cortocircuito sin considerar la dinámica del rotor. Al servir únicamente como una línea base de proximidad eléctrica, recibe las ponderaciones más bajas. La corriente (λ_2, λ_4) recibe mayor peso que la tensión (λ_1, λ_3) debido a su mejor selectividad espacial.
- Durante Falla (Nivel Intermedio-Alto): es el núcleo del impacto electromecánico, donde el rotor acumula la mayor energía cinética. Recibe los pesos máximos del índice, priorizando fuertemente la corriente (λ_6, λ_8) para identificar a los generadores que inyectan más energía, filtrando el efecto de caídas generalizadas de tensión en la red (λ_5, λ_7).
- Post-Falla (Nivel Intermedio-Bajo): Analiza la tendencia inicial de desaceleración en una ventana de tiempo muy corta tras despejar la falla. Utiliza pesos moderados (λ_{10}, λ_{12} para corriente; λ_9, λ_{11} para tensión) para anticipar la pérdida de sincronismo sin llegar a las simulaciones exhaustivas de métodos tradicionales (ej. EPRI), reduciendo drásticamente el costo computacional.

Los valores específicos de λ_i y η se seleccionaron tras un barrido paramétrico en el sistema IEEE 39 nodos, evaluando la coincidencia con el criterio OMIB/EPRI para fallas en los nodos 11, 18 y 23. El análisis de sensibilidad mostró que los coeficientes de corriente son robustos, mientras que η=0.25 resultó ser el valor que mejor equilibra la penalización por sobreestimación sin eliminar generadores verdaderamente críticos. Bajo esta premisa, el enfoque central de la presente investigación radica en la evaluación de la severidad de las fallas y su estrecho acoplamiento con la dinámica postfalla, un análisis fundamental para priorizar tempranamente generadores críticos en estudios de estabilidad transitoria. Como resultado

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID101

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

directo de esta evaluación fenomenológica, se derivó el índice de criticidad propuesto (IC_k); no obstante, se reconoce que este indicador constituye una valiosa primera aproximación metodológica que deberá ser objeto de trabajos futuros, orientados a realizar un ajuste más fino de sus coeficientes de ponderación para incrementar su robustez ante una mayor diversidad de topologías y condiciones operativas de la red eléctrica.

2.5 Validación electromecánica del índice de criticidad.

La respuesta electromecánica del sistema se utiliza únicamente como referencia para la validación física del índice propuesto. Para ello, se emplea el criterio angular propuesto por EPRI, el cual permite identificar generadores críticos y no críticos a partir de sus desviaciones dinámicas.

La formación de estos grupos de generadores se fundamenta en el concepto de coherencia, según el cual los generadores que presentan oscilaciones angulares similares durante la perturbación se agrupan en máquinas equivalentes (Germond & Podmore, 1978; Pavella, 1998). Para ello, la identificación de los grupos críticos y no críticos se basa en el enfoque propuesto por EPRI (1977), que establece que los generadores con mayores desviaciones dinámicas angulares pertenecen al grupo crítico, mientras que el resto de las unidades conforman el grupo no crítico. En este sentido, la selección adecuada de los generadores críticos y no críticos resulta fundamental, ya que determina la capacidad del modelo equivalente para representar la respuesta transitoria del sistema multimáquina (EPRI, 1977; Pavella et al., 2000).

Por tanto, en este trabajo, el criterio angular propuesto por EPRI se utiliza como referencia de validación para contrastar el desempeño del índice respecto de la identificación convencional de generadores críticos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

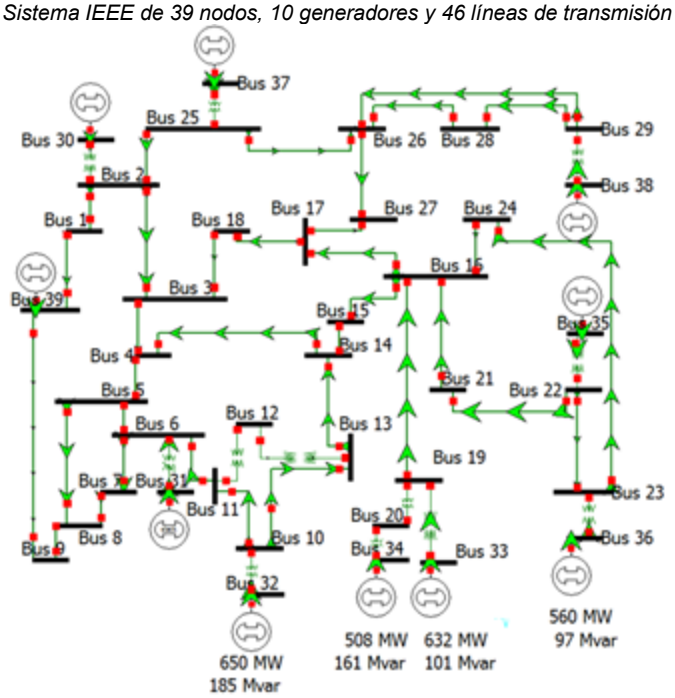
3.1 Casos de Estudio

Con la finalidad de evaluar el desempeño de las métricas propuestas para la identificación temprana de generadores críticos, se realizaron diferentes estudios de estabilidad transitoria utilizando el sistema de prueba IEEE de 39 nodos, también conocido como sistema New England, Figura 3. Este sistema constituye uno de los casos de estudio más utilizados para investigaciones relacionadas con la estabilidad angular y dinámica multimáquina debido a su complejidad electromecánica y adecuada representación de oscilaciones interárea.

La simulación dinámica y el estudio de cortocircuito fue realizado empleando el simulador PSS/E de Siemens (versión estudiantil), considerando modelos clásicos de generadores síncronos y manteniendo constantes las condiciones operativas iniciales para todos los escenarios evaluados. Para la evaluación del índice IC_k en estas simulaciones, se seleccionó un conjunto de valores fijos para los coeficientes de ponderación λ. Estos valores, definidos dentro de los rangos previamente justificados, se detallan enseguida:

$$\lambda_1 = 0.05, \quad \lambda_2 = 0.10, \quad \lambda_3 = 0.05, \quad \lambda_4 = 0.10.$$
$$\lambda_5 = 0.15, \quad \lambda_6 = 0.35, \quad \lambda_7 = 0.10, \quad \lambda_8 = 0.35.$$
$$\lambda_9 = 0.10, \quad \lambda_{10} = 0.20, \quad \lambda_{11} = 0.05, \quad \lambda_{12} = 0.15.$$

Figura 3.
Sistema IEEE de 39 nodos, 10 generadores y 46 líneas de transmisión



Con el propósito de analizar la sensibilidad de las métricas propuestas ante diferentes ubicaciones de perturbación y con ello establecer el índice de criticidad IC_k, se consideraron como casos de estudio la aplicación de fallas trifásicas balanceadas en los nodos 11, 18 y 23 del sistema. Estos nodos fueron seleccionados debido a su distinta ubicación eléctrica en la red, lo que permite evaluar el comportamiento de las métricas bajo diferentes niveles de severidad y acoplamiento electromagnético. Para todos los casos analizados, la duración de la falla se estableció en 100 ms, valor típicamente empleado en estudios de estabilidad transitoria para representar tiempos convencionales de actuación de sistemas de protección y despeje de fallas. Durante este intervalo se ejecutó el estudio de cortocircuito dinámico, para obtener las variables eléctricas y electromecánicas requeridas en la evaluación y validación de las métricas propuestas.

3.2 Comportamiento eléctrico estático: tensiones y corrientes durante la falla

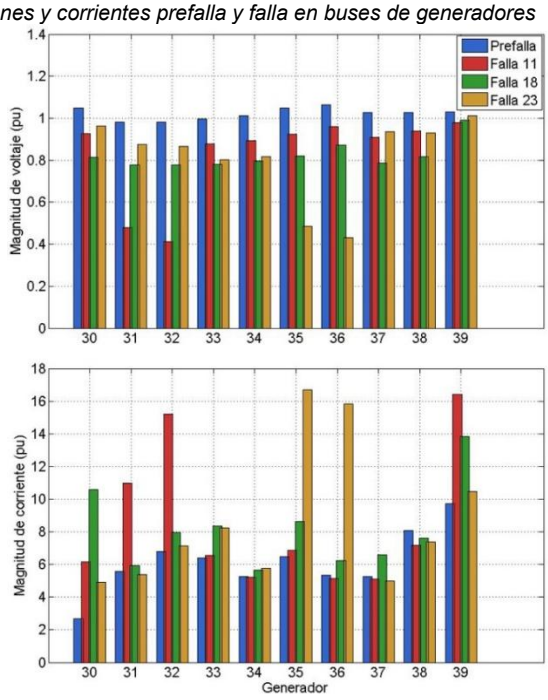
Con el fin de caracterizar la severidad eléctrica inicial de las perturbaciones, se analizan las magnitudes de tensión en terminales y corriente de salida de los generadores en condición prefalla y durante el cortocircuito trifásico. En la Figura 4 se presenta, para cada generador, la magnitud de tensión y corriente en *pu* en estado prefalla (barra azul) y durante la falla en los nodos 11, 18 y 23 (barras roja, verde y naranja respectivamente). Se observa que la caída de tensión es más pronunciada en los generadores que están eléctricamente más próximos al nodo fallado. Por ejemplo, ante la falla en el nodo 11, los generadores conectados a buses 31, 32 y 34 experimentan las mayores reducciones de tensión, mientras que aquellos en zonas más alejadas (buses 37, 38 y 39) mantienen tensiones cercanas al valor prefalla. Un aspecto

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID101

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

crítico se observa en la falla del nodo 18, en la que se registró un abatimiento generalizado de la tensión en la mayoría de los generadores. Este comportamiento refleja la dependencia de la respuesta estática de la topología de la red y justifica la necesidad de ponderar adecuadamente las métricas asociadas al voltaje.

Figura 4.
Tensiones y corrientes prefalla y falla en buses de generadores

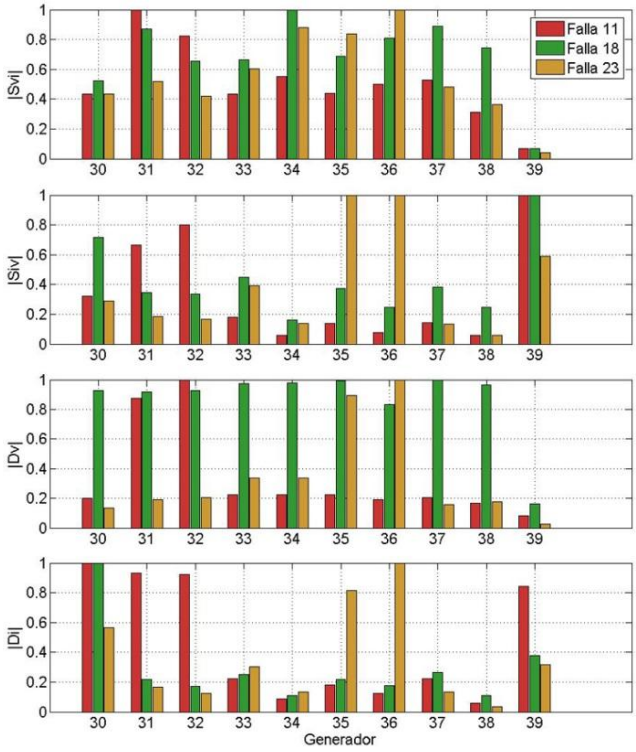


Por su parte, la respuesta de corriente muestra un comportamiento complementario: durante la falla, las corrientes se incrementan significativamente y se concentran en las unidades que alimentan directamente el cortocircuito. Destaca que, para la falla en el nodo 18, el generador del bus 36 alcanza el mayor incremento de corriente, mientras que la falla en el nodo 23 afecta principalmente a los generadores de los buses 33 y 34. Estas observaciones confirman que la severidad eléctrica —caracterizada mediante las impedancias operacionales de falla y las métricas ΔV, ΔI— está físicamente acoplada con la ubicación de la perturbación.

3.3 Métricas Fasoriales Cortocircuito Estático

La Figura 5 muestra los valores normalizados de las cuatro métricas estáticas para las fallas en los nodos 11, 18 y 23. Se aprecia un patrón distintivo: las métricas basadas en tensión (|Svi|, |Dv|) presentan magnitudes elevadas en un conjunto amplio de generadores, mientras que las basadas en corriente (|Siv|, |Di|) muestran alta magnitud únicamente en las máquinas eléctricamente próximas al cortocircuito. Por ejemplo, para la falla en el nodo 18 (barras color verde), los valores de las métricas |Svi| y |Dv| superan el valor de 0.8 en generadores conectados a los buses 30 a 38; no obstante, |Siv| y |Di| solo exceden dicho umbral en los generadores de los buses 30 y 39. Esta diferencia demuestra que las métricas de tensión tienden a sobreestimar el número de generadores afectados, mientras que las de corriente discriminan con mayor selectividad. En consecuencia, en la formulación del índice de criticidad se asigna un mayor peso a las métricas de corriente (|Siv|, |Di|) para reducir falsas alarmas y así destacar a los generadores que más contribuyen al desequilibrio electromecánico.

Figura 5.
Métricas estáticas de severidad para fallas en nodos 11, 18 y 23



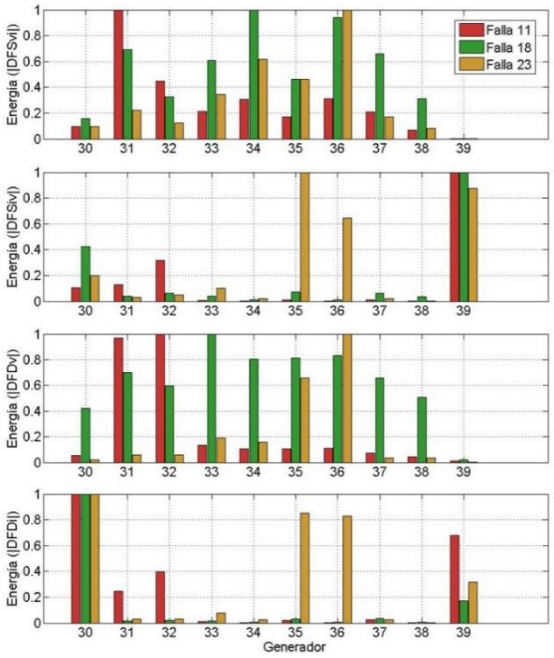
3.4 Métricas Fasoriales Cortocircuito Dinámico

En la Figura 6 se analiza la respuesta energética durante la falla. Las métricas asociadas a la dinámica de tensión, (*DFSvi* y *DFDv*), muestran valores elevados (≥0.7) en generadores alejados ante la falla en el nodo 18 (buses 31 y 33 a 37), confirmando su tendencia a sobreestimar la afectación. En cambio, las métricas de corriente, (*DFSiv* y *DFDi*) muestran alta selectividad (≥0.95) identificando únicamente a los generadores próximos al cortocircuito (buses 30 y 39). La diferencia es muy clara en el nodo18, donde *DFDi* y *DFSiv* discriminan entre generadores críticos (en buses 30 y 39) y no críticos (en buses 31 al 38), mientras que *DFDv* y *DFSvi* mantienen valores altos incluso en buses alejados. En cuanto a las fallas en los buses 11 y 23, la respuesta es consistente en todas las métricas. Finalmente, dado que las caídas generalizadas de tensión restan utilidad a sus respectivos indicadores para determinar la criticidad, las métricas dinámicas de corriente (*DFSiv,DFDi*) se consolidan como los parámetros principales para la jerarquización en el índice propuesto, evitando así falsas alarmas. Por su parte, las métricas dinámicas de voltaje podrán ser útiles de forma complementaria, pero únicamente en escenarios en los que no exista un abatimiento masivo de las tensiones en los generadores durante la falla.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID101

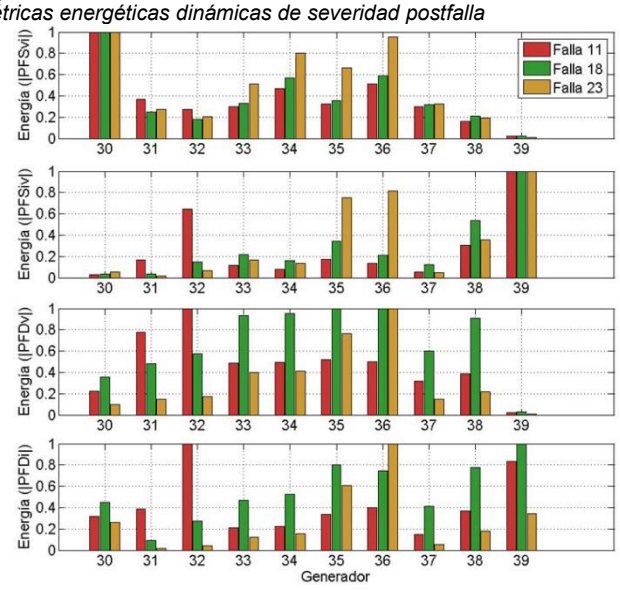
This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 6.
Métricas energéticas dinámicas de severidad durante la falla



El análisis del periodo posterior al despeje de la falla resulta fundamental para evaluar la capacidad del sistema de recuperar el sincronismo en el sistema. Para ello, las métricas de energía se extendieron al intervalo comprendido entre el despeje del cortocircuito y la primera desviación angular máxima en cualquier generador ($d\delta_k/dt = 0$). La Figura 7 muestra los valores normalizados de estas cuatro métricas post-falla (*PFSvi, PFSiv, PFDv, PFDi*) para las fallas en nodos 11, 18 y 23.

Figura 7.
Métricas energéticas dinámicas de severidad postfalla



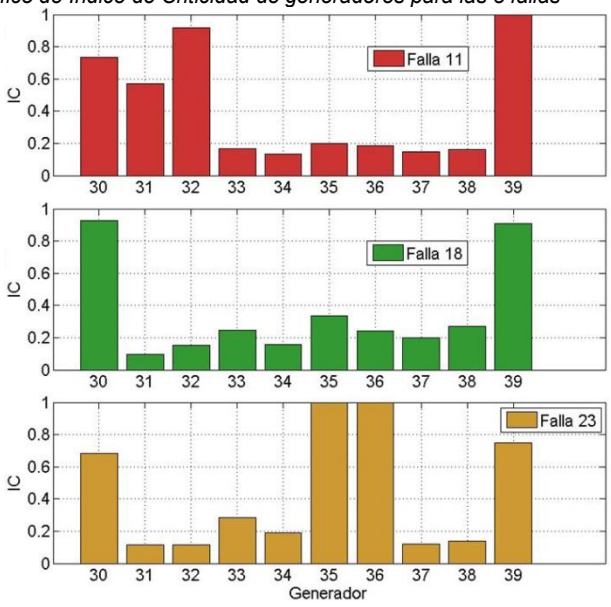
Se observa que las métricas de tensión (*PFDv* y, en menor medida, *PFSvi*) tienden a sobreestimar la afectación real, mostrando valores altos (>0.8) en un amplio conjunto de generadores ante la falla en el nodo 18 (buses 33 al 36, y 38). En cambio, las métricas de corriente (*PFSiv* y *PFDi*) exhiben alta selectividad, concentrando magnitudes elevadas (≥0.8) exclusivamente en las unidades más cercanas al disturbio. Por ejemplo, en el nodo 18, *PFSiv* resalta solo al bus 39, mientras que *PFDi* destaca identifica a los buses 35, 36, 38 y 39. Esta discriminación es aún más clara en la falla del nodo 23, donde *PFDi* señala únicamente a los generadores 36 y 35.

En consecuencia, las métricas dinámicas de corriente post-falla evitan la sobreestimación propia de las variables de tensión, consolidándose como indicadores robustos para jerarquizar generadores críticos en el índice propuesto.

Dado que las métricas puramente eléctricas (ΔV y ΔI) omiten la inercia y los modos de oscilación rotórica, dos generadores con idéntico *PFDi* pueden presentar trayectorias angulares distintas; por ello, resultan insuficientes por sí solas para predecir la pérdida de sincronismo. Sin embargo, al integrarlas en un índice multimétrico que pondera la severidad de la corriente, considera en menor medida las afectaciones de tensión y emplea un factor de penalización (η=0.25) para mitigar la sobreestimación estructural, se logra replicar la dinámica angular del sistema con buena precisión. El análisis comparativo confirma que esta integración de variables representa de manera consistente el comportamiento transitorio de la red. Bajo estas consideraciones, la Figura 8 muestra la jerarquización de los generadores evaluados; y establece como críticos a aquellos que superan el umbral de $IC_k > 0.70$.

Para evaluar la generalidad del método, se aplicó el IC_k en una contingencia nueva (falla en bus 14, Figura 9). Los buses 30, 32 y 39 mostraron los índices más altos (>0.65), lo cual coincide con su cercanía al punto de falla y con las mayores desviaciones angulares y de velocidad simuladas (Figura 10), lo que confirma su robustez. La Tabla 2 resume los resultados de los 4 escenarios.

Figura 8.
Gráfico de Índice de Criticidad de generadores para las 3 fallas



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID101

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 9.
Gráfico de Índice de Criticidad de generadores para falla en bus 14

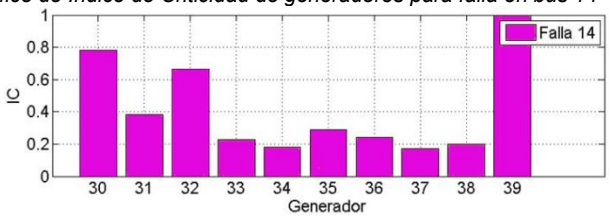


Figura 10.
Comportamiento de $\Delta\delta_k(t)$ y $\Delta\omega_k(t)$ ante falla en nodo 14

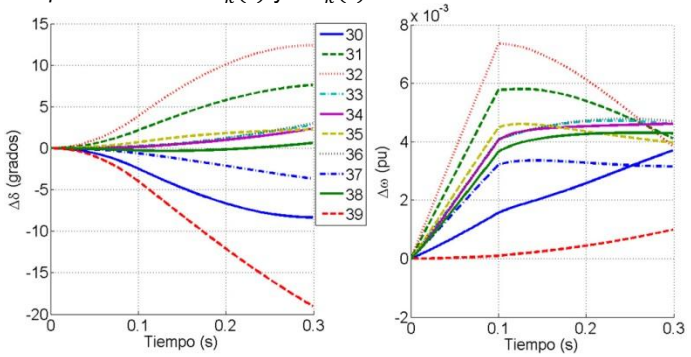


Tabla 2.
Comparación de generadores críticos identificados por el índice IC_k y la validación OMIB

Escenario de Falla	Generadores críticos (IC_k)	Generadores críticos (*OMIB*)	Coincidencia
Nodo 11	30, 32, 39	30, 31, 32, 39	3 de 4 Alta selectividad
Nodo 18	30, 39	30, 38, 39	2 de 3 η=0.25 filtra buses
Nodo 23	35, 36, 39	35, 36, 39	3 de 3 Alta selectividad
Nodo 14 (Validación)	*30, 32,39 (IC_k>0.65)*	30, 32, 39 (Figura 10)	Coincidente con respuesta dinámica

IV. CONCLUSIONES

El enfoque central de la presente investigación radicó precisamente en la evaluación de la severidad de las fallas y su estrecho acoplamiento con la dinámica postfalla, un análisis que demostró ser fundamental para lograr la priorización temprana de generadores críticos en estudios de estabilidad transitoria. Como resultado directo de esta evaluación del fenómeno de fallas, se desarrolló un índice multimétrico de criticidad (IC_k) basado exclusivamente en métricas fasoriales eléctricas obtenidas en condiciones prefalla, durante la falla y postfalla. A diferencia de los enfoques convencionales basados en el seguimiento de variables electromecánicas exhaustivas, la propuesta utiliza únicamente señales de tensión y corriente, lo que reduce la complejidad del análisis.

Los análisis dinámicos mostraron que las métricas basadas en corriente poseen una mayor capacidad discriminativa y selectividad que las asociadas a la tensión, las cuales tienden a sobreestimar la afectación en la red. Por ello, la formulación del índice incorpora ponderaciones diferenciadas y un término de penalización estratégico que mejora significativamente la jerarquización de los generadores que realmente contribuyen al desequilibrio.

La validación metodológica en el sistema IEEE de 39 nodos mostró una alta concordancia con los generadores críticos identificados mediante el método OMIB y el criterio angular de la EPRI, lo que demuestra su capacidad predictiva incluso en escenarios contingentes no utilizados durante la calibración. En consecuencia, la metodología propuesta constituye una herramienta analítica eficiente y de bajo costo computacional. La validación del índice mediante barrido paramétrico y análisis de sensibilidad confirma que la ponderación propuesta es consistente y no arbitraria, logrando una alta concordancia con los criterios de estabilidad convencionales en los escenarios evaluados. No obstante, se reconoce que el indicador propuesto constituye una valiosa primera aproximación metodológica que deberá ser objeto de trabajos futuros, orientados a realizar un ajuste más fino de sus coeficientes de ponderación mediante técnicas de optimización, con el objetivo de incrementar su robustez ante una mayor diversidad de topologías y condiciones operativas de la red eléctrica.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de la Laguna por las facilidades brindadas para la realización de la investigación y al Tecnológico Nacional de México por los recursos otorgados a través del proyecto TNM-24138.26-P.

VI. REFERENCIAS

Agrawal, R., & Thukaram, D. (2011). Identification of coherent synchronous generators in a Multi-Machine Power System using Support Vector Clustering. 2011 International Conference on Power and Energy Systems, Chennai, India, 1–6. DOI https://doi.org/10.1109/ICPES.2011.6156659.

Anderson, P. M., & Fouad, A. A. (2003). Power system control and stability (2nd ed.). IEEE Press.

Electric Power Research Institute. (1977). Development of dynamic equivalents for transient stability studies (Research Project 763, Report EL-456). EPRI. DOI:https://doi.org/10.2172/7105652

Eremia, M., & Shahidehpour, M. (2013). Handbook of electrical power system dynamics: Modeling, stability, and control. Wiley.

Germond, A. J., & Podmore, R. (1978). Dynamic Aggregation of Generating Unit Models. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-97(4), 1060–1069. https://doi.org/10.1109/TPAS.1978.354585

Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J. (2016). Power system analysis and design (6th ed.). Cengage Learning.

Juárez, C., Messina, A. R., Castellanos, R., & Espinosa-Perez, G. (2011). Characterization of multimachine system behavior using a hierarchical trajectory cluster analysis. IEEE

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Transactions on Power Systems, 26(3), 972–981. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2100051

Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. (2013). Analysis of electric machinery and drive systems (3rd ed.). Wiley-IEEE Press.

Kundur, P. (1994). Power system stability and control. McGraw-Hill.

Lee, S. T. Y., & Schweppe, F. C. (1973). Distance Measures and Coherency Recognition for Transient Stability Equivalents. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-92(5), 1550–1557. https://doi.org/10.1109/TPAS.1973.293701

Machowski, J., Białek, J. W., & Bumby, J. R. (2020). Power system dynamics: Stability and control (3rd ed.). Wiley.

Oppenheim, A. V., Willsky, A. S., & Nawab, S. H. (1997). Signals and systems (2nd ed.). Prentice Hall.

M. Pavella, Generalized one-machine equivalents in transient stability studies, in IEEE Power Engineering Review, vol. 18, no. 1, pp. 50-52, Jan. 1998, doi: 10.1109/39.646963.

Pavella, M., Ernst, D., & Ruiz-Vega, D. (2000). Transient stability of power systems: A unified approach to assessment and control. Springer.

Podmore, R. (1979). A Comprehensive Program For Computing Coherency-based Dynamic Equivalents. IEEE Conference Proceedings Power Industry Computer Applications Conference, PICA-79, Cleveland, OH, USA, 298–306. https://doi.org/10.1109/PICA.1979.720081

Saadat, H. (1999). Power system analysis. McGraw-Hill.

Savulescu, S. C. (2009). Real-time stability assessment in modern power system control centers. Wiley.

Sauer, P. W., Pai, M. A., & Chow, J. H. (2017). Power system dynamics and stability with Synchrophasor Measurement and Power System Toolbox, (2nd ed.). Wiley-IEEE Press.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización [Conceptualization]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
2	Curación de datos [Data curation]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Leticia Lozano Cuéllar
3	Análisis formal [Formal analysis]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruiz Ponce Leticia Lozano Cuéllar
5	Investigación [Investigation]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruiz Ponce
6	Methodología [Methodology]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Leticia Lozano Cuéllar
7	Administración del proyecto [Project administration]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
8	Recursos [Resources]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
9	Software [Software]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruiz Ponce
10	Supervision [Supervision]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruiz Ponce Leticia Lozano Cuéllar
11	Validación [Validation]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruiz Ponce Leticia Lozano Cuéllar
12	Visualización [Visualization]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruiz Ponce Leticia Lozano Cuéllar
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruiz Ponce Leticia Lozano Cuéllar

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID101

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Determinación de Factores Asociados a Prácticas de Consumo de Agua: Estudio sobre Hábitos en Estudiantes Universitarios

Determination of Factors Associated with Water Consumption Practices: A Study of University Students' Habits

Morales-López, J.E.[1]; Ruiz-Arroyo, I.[2] ✉; Álcala-Wong, D. [3]; Ruiz-Ayala, J.D. [4]; Aguirre-Mejía, E.T. [5]

Datos de Adscripción:

[1] Morales López, Jesús Enrique
Tecnológico Nacional de México/IT de La Laguna
jemoralesl@correo.itlalaguna.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3466-5794

[2] ✉ Ruiz Arroyo, Idalia
Tecnológico Nacional de México/IT de La Laguna
iruiza@lalaguna.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7288-2853

[3] Álcala Wong, Daniel
Tecnológico Nacional de México/IT de La Laguna
dalcalaw@correo.itlalaguna.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0558-1277

[4] Ruiz Ayala, José Dolores
Tecnológico Nacional de México/IT de La Laguna
jdruiza@correo.itlalaguna.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7269-2881

[5] Aguirre Mejía, Elena Tzetzangary
Tecnológico Nacional de México/IT de La Laguna
int.etaguirrem@lalaguna.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4472-6025

Resumen **- La escasez de agua es un problema creciente que requiere educar en conciencia ambiental y fomentar la adopción de prácticas sostenibles. El objetivo es analizar los hábitos de consumo y las prácticas de ahorro de estudiantes universitarios e identificar los factores asociados, a fin de orientar futuras intervenciones educativas. Se utiliza una metodología cuantitativa, no experimental, transversal y de alcance descriptivo-analítico; la muestra está conformada por 256 estudiantes, seleccionados por el método de conveniencia. Se aplica un cuestionario estructurado y validado por expertos, y se utiliza el alfa de Cronbach. Se utilizan la estadística descriptiva e inferencial para el análisis de datos, el chi-cuadrado, Kruskal-Wallis, Mann-Whitney, la correlación de Spearman y el análisis de regresión logística. Como resultado, se define un índice de ahorro de 5 prácticas elementales detectadas: se observó un 66% de ahorro de agua mediante la técnica de cerrar la llave al enjabonar las manos, un 69% en trapeado con cubeta, menor frecuencia, y un 41% en reutilizar agua de regadera. No se observa diferencia significativa de ahorro al analizar carreras universitarias o la edad, registrando $p > 0.05$. Se determina una asociación significativa entre la presencia de fugas y la reparación ($\chi^2=5.23$, $p=0.022$); se observa una correlación negativa débil entre el índice de ahorro y el consumo de agua ($\rho=-0.18$, $p=0.007$). La regresión indica la presencia de fugas (OR=3.13), asociada a un mayor índice de ahorro (OR=1.52), lo que incrementa la probabilidad de acción de mantenimiento. Conclusiones: se detectan áreas de mejora en los hábitos; se evidencia la necesidad de mejores estrategias que vinculen conocimiento, actitud y comportamiento para promover la cultura del agua en el ámbito universitario.**

Palabras clave **- Análisis cuantitativo, Conducta proambiental, Consumo de agua, Educación superior, Sostenibilidad ambiental.**

Abstract **- Water scarcity is a growing problem that requires raising environmental awareness and promoting sustainable practices. This study aims to analyze water consumption habits and saving practices among university students and identify associated factors to guide future educational interventions. We used a quantitative, non-experimental, cross-sectional, descriptive-analytical design. The sample included 256 students selected by convenience sampling. We used a structured questionnaire validated by experts and Cronbach's alpha. Data were analyzed using descriptive and inferential statistics, including chi-square, Kruskal–Wallis, Mann–Whitney, Spearman correlation, and logistic regression. A water-saving index based on five basic practices was defined. Results showed that 66% of students saved water by turning off the tap while soaping their hands, and 69% by mopping with a bucket. Reusing shower water was less frequent (41%). No significant differences were found by academic major or age ($p > 0.05$). A significant association was observed between the presence of leaks and their repair ($\chi^2 = 5.23$, $p = 0.022$). A weak negative correlation was found between the saving index and water consumption ($\rho = -0.18$, $p = 0.007$). Logistic regression showed that leak presence (OR = 3.13) and the saving index (OR = 1.52) increased the likelihood of maintenance actions. In conclusion, the study identified areas for improvement in habits, highlighting the need for strategies that link knowledge, attitudes, and behavior to promote a water-conscious culture in universities.**

Keywords **- Environmental sustainability, Higher education, Pro-environmental behavior, Quantitative analysis, Water consumption.**

I. INTRODUCCIÓN

La crisis hídrica contemporánea es un problema socioecológico intensificado por la interacción entre el cambio climático, el deterioro de los ecosistemas y el aumento de la demanda por la urbanización, la agricultura y la industria. La sostenibilidad

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID103

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

ambiental exige comprender que el agua no es solo un insumo, sino también un regulador del bienestar humano y de la estabilidad ecosistémica.
Evidencia reciente advierte sobre escenarios de escasez global sin precedentes asociados a la combinación de sequías y patrones de consumo intensivo (Ravinandrasana & Franzke, 2025).
El desarrollo sustentable busca equilibrar las necesidades presentes con la preservación de las capacidades futuras, lo que se traduce en una gestión responsable: eficiencia, equidad, resiliencia y cuidado de la calidad del agua, articuladas mediante gobernanza (reglas, instituciones, participación y rendición de cuentas).
Los mejores resultados dependen de la cooperación interinstitucional, la coordinación multinivel y la participación social significativa (Di Vaio et al., 2021), así como de enfoques integrados y decisiones transparentes, en los que el componente cultural-educativo sostiene cambios conductuales (Bilalova et al., 2025).

En la educación superior, especialmente en las instituciones tecnológicas, la misión es formar profesionales que tomarán decisiones con impactos directos en los recursos y los ecosistemas; por ello, su responsabilidad socioambiental implica integrar la sostenibilidad en la docencia, la investigación, la extensión y la gestión del campus. Investigaciones recientes destacan una visión relacional de la universidad socialmente responsable, que responde a desafíos sociales y ambientales mediante políticas, alianzas y la evaluación de impactos (Godonoga & Sporn, 2023).
Fortalecer la responsabilidad social universitaria puede traducirse en contribuciones verificables al desarrollo sostenible, lo que posiciona al campus como espacio idóneo para impulsar la cultura del agua (Alsrehan, 2025).

La conciencia ambiental, vista como competencia formativa, integra dimensiones cognitivas (comprensión y conocimiento aplicable), actitudinales (valores y disposición) y conductuales (hábitos observables). En el ámbito sociotecnológico, supone decidir de manera responsable la aplicación, uso y mantenimiento de la tecnología (medición, ahorro, monitoreo, análisis de datos) para anticipar las consecuencias ambientales y sociales.
La evidencia sugiere que la conciencia ambiental conecta la información con la conducta proambiental al activar motivaciones, normas y habilidades para la acción (Bouzari et al., 2022).

Para implementar competencias socioambientales se requiere un diagnóstico de hábitos ambientales en universitarios, apoyado en cuestionarios tipo Likert que midan conductas específicas y sus determinantes psicosociales (actitudes, normas, control percibido), junto con factores contextuales del campus.

En el consumo hídrico, se indagan prácticas cotidianas (uso de grifos, duchas, lavado, reutilización, reporte de fugas) y percepciones de escasez y responsabilidad.
Enfoques basados en la Teoría del Comportamiento Planeado han demostrado utilidad para explicar diferencias en las conductas de ahorro (Wang et al., 2024). Estudios sobre acciones, creencias y percepciones confirman que los hábitos dependen tanto de la información como de las condiciones situacionales (Broering et al., 2024).

En cuanto a la integración de proyectos integradores (aprendizaje basado en proyectos) que vinculan problemas auténticos con la integración de saberes y la producción de evidencias aplicables para la concientización ambiental, el valor central radica en el diagnóstico y la acción: identificar hábitos y determinantes y diseñar soluciones viables (campañas, mejoras de infraestructura, monitoreo del consumo, compromisos grupales), con evaluación de resultados.

Estudios recientes reportan que esta estrategia puede incrementar la comprensión y la apropiación de metas de sostenibilidad cuando se articula con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y con productos evaluables (Espino-Díaz et al., 2025), y que los cursos con enfoque por proyectos impactan en componentes de conciencia de sostenibilidad (conocimiento, actitudes y conductas), lo que respalda su uso para fortalecer la cultura del agua y el consumo responsable en el campus (Ásványi y Gedeon, 2025).

Los proyectos integradores (aprendizaje basado en proyectos) vinculan problemas auténticos con la integración de saberes y la producción de evidencias aplicables. Para la concienciación ambiental, el valor central radica en el diagnóstico y la acción: identificar hábitos y determinantes y diseñar soluciones viables (campañas, mejoras de infraestructura, monitoreo del consumo, compromisos grupales), con evaluación de resultados.
Esta estrategia puede incrementar la comprensión y la apropiación de las metas de sostenibilidad (Espino-Díaz et al., 2025), y los cursos con enfoque por proyectos impactan en componentes de conciencia de sostenibilidad (Ásványi & Gedeon, 2025).

Aunque existen estudios sobre hábitos de consumo de agua en universitarios, pocos se centran en instituciones de educación superior tecnológica de países en desarrollo y menos aún vinculan el diagnóstico con proyectos integradores. Por ello, este estudio tuvo como objetivo general identificar los hábitos de consumo de agua y analizar los factores asociados en estudiantes de una universidad tecnológica participante en un proyecto integrador de concienciación hídrica.

Los objetivos específicos fueron:

1. Describir las prácticas de ahorro y construir un índice agregado.
2. Comparar el consumo declarado según variables sociodemográficas.
3. Evaluar la asociación entre la presencia de fugas y su reparación.
4. Determinar la relación entre el índice de ahorro y el consumo.
5. Identificar predictores de la reparación de fugas mediante regresión logística.

Hipótesis

- H1 – Existe asociación positiva entre reportar fugas y repararlas.
- H2 – A mayor índice de ahorro, menor consumo declarado (correlación negativa).
- H3 – El índice de ahorro y la presencia de fugas predicen la reparación de fugas.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID103

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO.

2.1 Metodología

Estudio cuantitativo, no experimental, de corte transversal y alcance descriptivo-correlacional (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).
Se caracterizó el fenómeno (hábitos de consumo) y se exploraron relaciones entre variables mediante inferencia estadística. La investigación se realizó en una institución de educación superior (IES) tecnológica del centro de México, en el marco de un proyecto integrador sobre cuidado del agua durante el período académico enero-junio de 2024.

La muestra estuvo conformada por 256 estudiantes seleccionados mediante muestreo no probabilístico por conveniencia, todos ellos participantes en las actividades del proyecto integrador.

Criterios de inclusión
- Estar inscrito en alguna carrera de la IES.
- Haber aceptado voluntariamente participar.
- Tener al menos 18 años.

Criterios de exclusión
- No se excluyó por género.

Se empleó un cuestionario estructurado autoadministrado, diseñado ad hoc para identificar hábitos de consumo de agua y prácticas de ahorro en el ámbito doméstico. Constaba de tres bloques:

- Variables sociodemográficas: edad (años cumplidos), carrera, tipo de vivienda.
- Consumo declarado de agua: pregunta sobre el volumen mensual en metros cúbicos (m^3) según el recibo del hogar.
- Conductas específicas de ahorro (5 ítems en escala dicotómica sí/no): cerrar la llave al enjabonarse, reutilizar agua de la regadera, lavar trastes con tina en lugar de chorro continuo, trapear con cubeta (no con manguera) y reparar fugas cuando se detectan.
- Presencia de fugas en el hogar (sí/no).

2.2 Validación y fiabilidad

El *cuestionario* fue sometido a validación de contenido mediante juicio de 3 expertos en sostenibilidad y educación ambiental. Se depuraron ítems y se ajustó la redacción. Posteriormente, se realizó una prueba piloto con 30 estudiantes (no incluidos en la muestra final).

La fiabilidad del índice de ahorro (suma de 5 prácticas) fue aceptable: alfa de Cronbach = 0.71 (consistencia interna moderada). La fiabilidad test-retest (2 semanas, n=25) mostró una correlación de 0.85.

El cuestionario se aplicó en formato digital (Google Forms) durante las horas de clase de los cursos integradores, entre marzo y abril de 2024.

Los estudiantes recibieron un enlace con instrucciones y un consentimiento informado (ver sección ética). El tiempo de respuesta promedio fue de 10 minutos. No hubo incentivos.

Tabla 1
Distribución de estudiantes participantes según la carrera

Carrera	Encuestas aplicadas	Porcentaje de participación
Ingeniería Eléctrica	21	8%
Ingeniería Electrónica	3	1%
Ingeniería en Gestión Empresarial	28	11%
Ingeniería Industrial	50	20%
Ingeniería Mecánica	17	7%
Ingeniería Mecatrónica	30	12%
Ingeniería Química	33	13%
Ingeniería en Energías Renovables	14	5%
Ingeniería en Semiconductores	8	3%
Ingeniería en Sistemas Computacionales	52	20%

2.3 Análisis estadístico

Los datos se limpiaron y codificaron en SPSS versión 25. Se realizó:

- Estadística descriptiva (frecuencias, medias, desviaciones estándar, medianas y rango intercuartílico, RIC).
- Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para consumo declarado ($p < 0.001$, asimetría = 2.1), justificando el uso de pruebas no paramétricas.
- Índice de ahorro:
  Suma de prácticas ahorradoras (rango 0–5).
- Asociaciones entre variables categóricas:
  Chi-cuadrado (χ^2).
- Comparación de consumo entre grupos:
  Kruskal-Wallis (para carrera) y Mann-Whitney (para presencia de fugas).
- Correlación entre índice de ahorro y consumo:
  Spearman (ρ).
- Regresión logística binaria (método enter) para predecir la probabilidad de reparar fugas, con predictores: presencia de fugas (sí/no), índice de ahorro (excluyendo el ítem "repara fugas") y edad (años). Se reportan odds ratios (OR) con IC del 95%, pseudo R^2 de Nagelkerke, prueba de Hosmer-Lemeshow y porcentaje de clasificación correcta.
  Nivel de significancia $\alpha = 0.05$ (Field, 2018).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

En el análisis descriptivo de la tabla 1, participaron 256 estudiantes de 10 carreras universitarias del campus. El 49% tenía entre 22 y 24 años, el 38% entre 20 y 21 años, y el 13% restante ≥25 años.
Las carreras más representadas fueron Ingeniería en Sistemas Computacionales (20%), Ingeniería Industrial (20%), Ingeniería Mecatrónica (18%) e Ingeniería en Gestión Empresarial (15%). El 64% vivía en casa con sus padres, el 22% en un departamento compartido y el 14% en una residencia universitaria o solo.

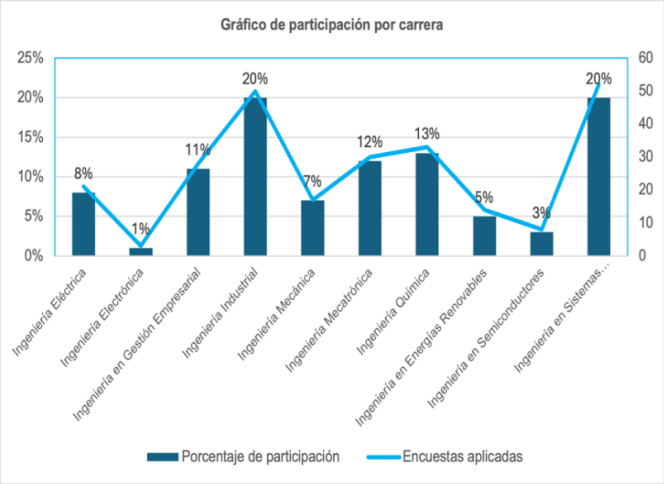
Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID103

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Asimismo, se realizó un análisis participativo por carrera; se observa en la Figura 1 la distribución de la participación por carreras.

Figura 1
Gráfico de participación por carrera



Nota. La participación del 100% está dividida en un total de 10 carreras.

La Tabla 2 resume las prácticas reportadas. Las más frecuentes fueron cerrar la llave al enjabonarse (66%) y trapear con cubeta (69%).

Las menos adoptadas:

- Reutilizar agua de la regadera (41%).
- Lavar trastes con tina (42%).

Tabla 2
Frecuencia de prácticas de ahorro de agua (N=256)

Práctica	*Sí (%)*	*No (%)*
Cerrar llave al enjabonarse	66.0	34.0
Reutilizar agua de regadera	41.4	58.6
Lavar trastes con tina	42.2	57.8
Trapear con cubeta	69.1	30.9
Reparar fugas	62.9	37.1

El índice de ahorro (suma de 0 a 5) tuvo una media de 2.8 (DE = 1.4), mediana = 3.0, rango 0–5. La distribución fue unimodal y ligeramente asimétrica negativa.

Asociaciones con variables sociodemográficas

No se encontró asociación estadísticamente significativa entre la carrera (agrupada en 7 disciplinas) y cerrar la llave al enjabonarse ($\chi^2 = 4.17$, gl = 6, p = 0.65), ni entre la edad (tres grupos) y trapear con cubeta ($\chi^2 = 1.64$, gl = 2, p = 0.44). Tampoco hubo diferencias en el índice de ahorro por género (U = 7895, p = 0.32).

Relación entre fugas y su reparación

Se detectó una asociación significativa entre la presencia de fugas en el hogar y la acción de repararlas ($\chi^2 = 5.23$, gl = 1, p = 0.022). El 81,3% de quienes reportaron fugas indicaron repararlas, frente al 60,3% de quienes no reportaron fugas. En la Tabla 3 se presenta dicha información. En la figura 1 se observa gráficamente esta asociación.

Tabla 3
Asociación entre presencia de fugas y reparación de fugas

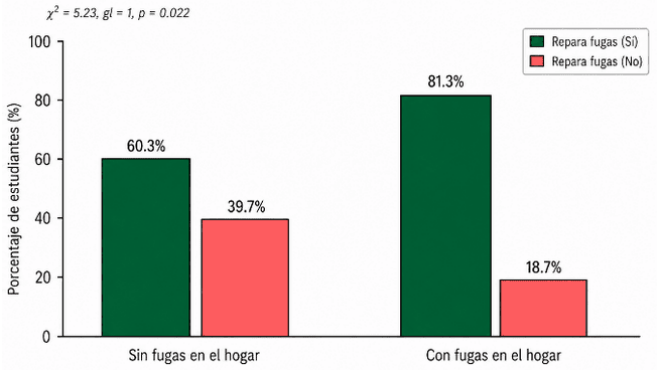
Fugas en casa	*Repara fugas (Sí)*	*Repara fugas (No)*	*Total*
No	135 (60.3%)	89 (39.7%)	224
Sí	26 (81.3%)	6 (18.7%)	32

Nota. $\chi^2 = 5.23$, gl = 1, p = 0.022. Porcentajes por fila.

Consumo declarado de agua

- La mediana global de consumo mensual fue de 13.0 m³ (RIC: 8.0–16.0).
- No se encontraron diferencias significativas entre las carreras (Kruskal-Wallis: H = 9.81, gl = 6, p = 0.14) ni entre hogares con y sin fugas (Mann-Whitney: U = 2413, p = 0.26).
- La Figura 2 muestra la distribución del consumo según el nivel de ahorro.

Figura 2
Proporción de estudiantes que reparan fugas según presencia de fugas en el hogar



Nota: Proporción de estudiantes que reparan fugas con respecto a la presencia de fugas en el hogar. $\chi^2 = 5.23$, gl = 1, p = 0.022

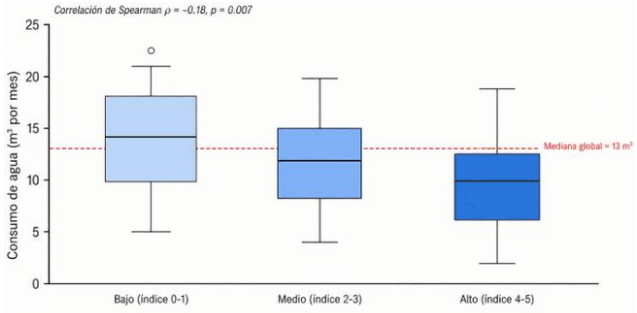
Relación entre índice de ahorro y consumo

La correlación de Spearman entre el índice de ahorro y el consumo declarado fue negativa, débil pero estadísticamente significativa: ρ = –0.18, p = 0.007. Esto indica que un mayor número de prácticas ahorradoras se asocia con un consumo ligeramente menor.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID103

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 3
Distribución del consumo de agua según nivel de ahorro.



Nota: Diagrama de caja del consumo mensual de agua declarado (m³) según nivel de ahorro (bajo: índice 0-1, medio: índice 2-3, alto: índice 4-5). La línea roja discontinua representa la mediana global (13 m³). La correlación de Spearman entre el índice de ahorro y el consumo fue ρ = -0.18, p = 0.007.

Modelo de regresión logística para reparar fugas

- Se ajustó un modelo logístico binario con n = 224 (se excluyeron 32 casos por valores faltantes en alguna variable predictora).
- El modelo fue significativo ($\chi^2 = 18.3$, gl = 3, $p < 0.001$), con un pseudo R^2 de Nagelkerke = 0.12 y un porcentaje de clasificación correcta del 71.4%. La prueba de Hosmer-Lemeshow indicó buen ajuste ($\chi^2 = 6.2$, gl = 8, p = 0.62).
- Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4
Factores asociados a la reparación de fugas (regresión logística)

Variable	β (EE)	OR (IC 95%)	p
Fugas (sí)	1.14 (0.51)	3.13 (1.22–8.05)	0.018
Índice de ahorro (sin ítem de reparación)	0.42 (0.15)	1.52 (1.14–2.04)	0.004
Edad (años)	0.03 (0.07)	1.03 (0.94–1.13)	0.53

Nota. n=224. Modelo ajustado por el método enter. Variables incluidas simultáneamente. El índice de ahorro excluye el ítem "repara fugas" para evitar redundancia.

Interpretación

- Reportar fugas en el hogar triplica la probabilidad de repararlas (OR = 3.13).
- Cada práctica adicional de ahorro (diferente a reparar fugas) incrementa en un 52% la probabilidad de reparar
- fugas, independientemente de la presencia de estas.
- La edad no resultó predictora significativa.

3.2 Discusión

El presente estudio tuvo como objetivo identificar hábitos de consumo de agua y factores asociados en estudiantes de educación superior tecnológica.

Los hallazgos principales indican que, aunque prácticas básicas como cerrar la llave al enjabonarse y trapear con cubeta están relativamente extendidas (≈66–69%), otras conductas de mayor complejidad (reutilización de agua, lavado con tina) muestran una adopción inferior al 45%.

Este patrón es consistente con lo reportado por Broering et al. (2024) en universitarios brasileños, donde las acciones de bajo costo y alta visibilidad (cerrar la llave) son más frecuentes que aquellas que implican reorganización de rutinas.

La asociación significativa entre la presencia de fugas y su reparación (OR = 3.13) sugiere que la percepción del problema es un gatillo conductual relevante.
Sin embargo, un 39.7% de quienes no reportaron fugas indicaron repararlas (probablemente por mantenimiento preventivo), y un 18.7% de quienes sí tenían fugas no las repararon.

Esto puede deberse a barreras como falta de habilidades técnicas, costos o dependencia del propietario de la vivienda, tal como señalan Wang et al. (2024) en el contexto de la Teoría del Comportamiento Planeado: el control conductual percibido modula la intención-acción.

El índice de ahorro mostró una correlación negativa débil pero significativa con el consumo declarado (ρ = –0.18). La magnitud es pequeña, pero comparable con estudios previos (Broering et al., 2024, encontraron ρ = –0.22).

Esto indica que las prácticas ahorradoras influyen, pero el consumo también depende de factores no medidos: número de habitantes en el hogar, eficiencia de electrodomésticos, clima regional, etc. Futuros estudios deberían incluir mediciones objetivas (lecturas de medidor) y variables contextuales.

Un hallazgo novedoso es que cada práctica adicional de ahorro (sin incluir reparación) incrementa en un 52% la probabilidad de reparar fugas, incluso controlando por la presencia de estas. Esto sugiere la existencia de un perfil de comportamiento proambiental coherente: los estudiantes que adoptan más prácticas de ahorro también son más proactivos en el mantenimiento.

Este resultado respalda el enfoque de intervenciones educativas que promuevan un conjunto integrado de conductas, más que acciones aisladas (Espino-Díaz et al., 2025).

No se encontraron diferencias significativas por carrera o edad, lo que podría deberse a la homogeneidad relativa de la muestra (universidad tecnológica, rango etario estrecho).

Sin embargo, contradice parcialmente a Wang et al. (2024), quienes hallaron que los estudiantes de ciencias ambientales mostraban mayor ahorro.

Una explicación posible es que en esta institución aún no se han integrado fuertemente los contenidos de sostenibilidad en todas las carreras, por lo que la formación disciplinar no modula los hábitos.

Limitaciones del estudio:

1. Muestreo por conveniencia, lo que limita la generalización a otras poblaciones.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

2. Consumo declarado, sujeto a sesgo de memoria y deseabilidad social (los estudiantes podrían subestimar su consumo).
3. Diseño transversal no permite establecer causalidad.
4. El índice de ahorro se basó en autorreporte y en solo cinco ítems; una escala más amplia podría captar mejor la complejidad.
5. La fiabilidad del índice fue aceptable pero no alta (α = 0.71).
6. No se midieron variables psicológicas (actitudes, normas subjetivas) que podrían mediar las conductas.

Implicaciones prácticas:

Para el proyecto integrador de concienciación hídrica, los resultados sugieren enfocar las intervenciones en:

a. Promover prácticas menos adoptadas (reutilización de agua, lavado con tina) mediante talleres y recordatorios ambientales;
b. Ofrecer formación en reparación básica de fugas (empoderamiento técnico)
c. Utilizar el índice de ahorro como herramienta de autoevaluación y seguimiento;
d. Diseñar campañas que refuercen la coherencia conductual (quienes ahorran también reparan). Además, se recomienda medir objetivamente el consumo en futuras iteraciones del proyecto.

IV. CONCLUSIONES

Este estudio logró identificar los hábitos de consumo de agua en estudiantes de educación superior tecnológica, así como factores asociados significativos: la presencia de fugas y el índice acumulado de prácticas ahorradoras predicen la reparación de fugas; además, existe una correlación negativa débil entre más prácticas ahorradoras y menor consumo declarado. No se encontraron diferencias por carrera o edad.

El principal aporte del estudio es empírico: proporciona un diagnóstico basal cuantitativo de conductas hídricas en una población poco estudiada (estudiantes de tecnológicos mexicanos) y evidencia la relevancia de la coherencia conductual (quienes ahorran en varias dimensiones también mantienen la infraestructura). Teóricamente, respalda la extensión de la Teoría del Comportamiento Planeado al incluir un índice de comportamientos previos como predictor de acciones de mantenimiento.

Recomendaciones para la institución:

1. Integrar el diagnóstico de hábitos como actividad inicial de los proyectos integradores.

2. Diseñar intervenciones diferenciadas: para estudiantes con bajo índice de ahorro, enfocarse en prácticas básicas; para aquellos con índice medio/alto, promover la reparación de fugas y reutilización.

3. Implementar un sistema de monitoreo de consumo real (submedición en baños y fuentes de agua del campus).

4. Evaluar el impacto de las intervenciones con diseño pre-post.

Investigación futura:

Se sugiere replicar el estudio con muestras probabilísticas, incluyendo mediciones objetivas de consumo, ampliando el número de ítems del índice (por ejemplo, duración de duchas, uso de electrodomésticos eficientes), e incorporando variables psicosociales (normas, control percibido).

También sería valioso un estudio longitudinal que siga a los estudiantes durante el proyecto integrador para evaluar cambios en hábitos. Finalmente, comparar diferentes carreras tecnológicas con y sin formación explícita en sostenibilidad permitiría aislar el efecto curricular.

En síntesis, la educación superior tecnológica puede contribuir a la sostenibilidad hídrica mediante diagnósticos participativos y proyectos integradores que fomenten la coherencia conductual. Este estudio aporta una base metodológica y empírica para diseñar tales intervenciones.

V. AGRADECIMIENTOS

Se hace extensivo el agradecimiento al Tecnológico Nacional de México/IT de la Laguna, por las facilidades otorgadas para la realización del proyecto integrador en mención, además de agradecer también a los estudiantes que participaron en el proyecto, tanto desde la parte operativa como a aquellos que ayudaron en el proceso de recogida de información, contestando el instrumento de medición.

VI. REFERENCIAS

Alsrehan, H. (2025). The social responsibility of universities and its impact on sustainable development: Towards a future vision. *Sustainable Development, 33*(5), 6495–6504. https://doi.org/10.1002/sd.3465

Ásványi, K., & Gedeon, E. (2025). Enhancing sustainability consciousness in higher education: Short- and long-term impacts of a project-based learning approach. The International Journal of Management Education, 23(3), Artículo 101235. https://doi.org/10.1016/j.ijme.2025.101235

Bilalova, S., Newig, J., & Villamayor-Tomas, S. (2025). Toward sustainable water governance? Taking stock of paradigms, practices, and sustainability outcomes. WIREs Water, 12(1), Artículo e1762. https://doi.org/10.1002/wat2.1762

Bouzari, M., Safavi, H. P., & Foroutan, T. (2022). Outcomes of environmental awareness. International Journal of Contemporary Hospitality Management, 34(10), 3655–3676. https://doi.org/10.1108/IJCHM-11-2021-1412

Broering, L. A., Michel, J., Henning, E., Kalbusch, A., & Konrath, A. C. (2024). An investigation into water consumption by university

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

students: Actions, beliefs, and perceptions. Discover Water, 4, Artículo 114. https://doi.org/10.1007/s43832-024-00176-9

Di Vaio, A., Trujillo, L., D'Amore, G., & Palladino, R. (2021). Water governance models for meeting sustainable development goals: A structured literature review. Utilities Policy, 72, Artículo 101255. https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101255

Espino-Díaz, L., Luque-González, R., Fernández-Caminero, G., & Álvarez-Castillo, J. L. (2025). Exploring the impact of project-based learning on sustainable development goals awareness and university students' growth. European Journal of Educational Research, 14(1), 283–296. https://doi.org/10.12973/eu-jer.14.1.283

Field, A. (2018). Discovering statistics using IBM SPSS Statistics (5.ª ed.). SAGE Publications.

Godonoga, A., & Sporn, B. (2023). The conceptualisation of socially responsible universities in higher education research: A systematic literature review. Studies in Higher Education, 48(3), 445–459. https://doi.org/10.1080/03075079.2022.2145462

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill Interamericana Editores.

Ravinandrasana, V. P., & Franzke, C. L. E. (2025). The first emergence of unprecedented global water scarcity in the Anthropocene. Nature Communications, 16(1), Artículo 8281. https://doi.org/10.1038/s41467-025-63784-6

Wang, X., Liu, Z., & Zhang, Y. (2024). Differences in water-saving behaviors among college students: Research based on the theory of planned behavior. Sustainability, 16(23), Artículo 10182. https://doi.org/10.3390/su162310182

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización [Conceptualization]	Jesús Enrique Morales López. Idalia Ruiz Arroyo. Daniel Álcala Wong. José Dolores Ruiz Ayala. Elena Tzetzangary Aguirre Mejía.
2	Curación de datos [Data curation]	Jesús Enrique Morales López.
3	Análisis formal [Formal analysis]	José Dolores Ruiz Ayala.
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	No aplica.
5	Investigación [Investigation]	Jesús Enrique Morales López. Idalia Ruiz Arroyo. Daniel Álcala Wong. José Dolores Ruiz Ayala. Elena Tzetzangary Aguirre Mejía.
6	Methodología [Methodology]	Elena Tzetzangary Aguirre Mejía.
7	Administración del proyecto [Project administration]	Elena Tzetzangary Aguirre Mejía.
8	Recursos [Resources]	No aplica.
9	Software [Software]	No aplica.
10	Supervision [Supervision]	Idalia Ruiz Arroyo.
11	Validación [Validation]	Elena Tzetzangary Aguirre Mejía. Idalia Ruiz Arroyo.
12	Visualización [Visualization]	Elena Tzetzangary Aguirre Mejía. Idalia Ruiz Arroyo.
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Jesús Enrique Morales López. Idalia Ruiz Arroyo. Daniel Álcala Wong. José Dolores Ruiz Ayala. Elena Tzetzangary Aguirre Mejía
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Elena Tzetzangary Aguirre Mejía. Idalia Ruiz Arroyo.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID103

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Estudio Paramétrico para la Mejora de la Respuesta Dinámica de un Inversor Fotovoltaico Conectado a la Red Mediante el Lugar Geométrico de las Raíces

Parametric Study on Improving the Dynamic Response of a Grid-Connected Photovoltaic Inverter using Root Locus

Camacho-Sifuentes, R.G.[1]; Sellschopp-Sánchez, F.S.[2]; Ruíz-Ponce, G.E.[3]

Datos de Adscripción:

[1] ✉ Camacho Sifuentes, Rita Guadalupe
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coahuila, México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/00xbw4a70
m.rgcamachos@lalaguna.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9386-1604

[2] Sellschopp Sánchez, Francisco Sergio
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coahuila, México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/00xbw4a70
fsellschopps@correo.itlalaguna.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3516-3523

[3] Ruiz Ponce, Gerardo Enrique
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coahuila, México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/00xbw4a70
geruizp@lalaguna.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1423-4222

Resumen **- Este artículo presenta un estudio paramétrico orientado a la mejora de la respuesta dinámica de un inversor fotovoltaico trifásico conectado a la red eléctrica, buscando mejorar la estabilidad relativa, el factor de amortiguamiento y la agilidad de respuesta ante cambios. El análisis se centra en mitigar los efectos transitorios producidos por una conexión súbita de carga, ya que, dentro de los lazos de control del inversor, el evento induce una perturbación de tipo impulsivo con decaimiento exponencial en el voltaje del eje q, mientras que el eje d mantiene una transición monotónica tipo escalón, validando el desacoplamiento efectivo de los lazos de control. La metodología emplea las bases del Lugar Geométrico de las Raíces como marco de análisis para evaluar el desplazamiento de los polos del sistema, obtenido mediante un barrido paramétrico discreto de las ganancias de los controladores PI. A través de este enfoque analítico, se identificó una región de operación que permite la proximidad entre polos y ceros dominantes, reduciendo el residuo del modo transitorio, optimizando el amortiguamiento del sistema sin recurrir a algoritmos computacionales complejos. Los resultados, obtenidos mediante simulaciones en el entorno MATLAB/Simulink, demuestran que la sintonía derivada del estudio paramétrico logra reducir el sobreimpulso transitorio en el eje q en un porcentaje mayor al 40%. Se concluye que el uso del Lugar Geométrico de las Raíces como herramienta de diseño proporciona una comprensión profunda de la sensibilidad del sistema, permitiendo robustecer la operación de centrales fotovoltaicas ante cambios dinámicos en la demanda de la red.**

Palabras Clave **- Análisis Paramétrico, Control de Inversores, Estabilidad Relativa, Lugar Geométrico de las Raíces, Respuesta Transitoria, Sistemas Fotovoltaicos.**

Abstract **- This article presents a parametric study aimed at improving the dynamic response of a three-phase photovoltaic inverter connected to the grid, with the goal of enhancing relative stability, damping factor, and response agility to changes. The analysis focuses on mitigating the transient effects caused by a sudden load connection, since within the inverter's control loops, the event induces an impulse-type disturbance with exponential decay in the q-axis voltage, while the d-axis maintains a step-like monotonic transition, validating the effective decoupling of the control loops. The methodology employs the foundations of the Root Locus as an analytical framework to evaluate the displacement of the system's poles, obtained through a discrete parametric sweep of the PI controller gains. Through this analytical approach, an operating region was identified that allows proximity between dominant poles and zeros, reducing the residue of the transient mode and optimizing the system damping without resorting to complex computational algorithms. The results, obtained through simulations in the MATLAB/Simulink environment, demonstrate that the tuning derived from the parametric study reduces the transient overshoot on the q-axis by more than 40%. It is concluded that the use of Root Locus as a design tool provides a deep understanding of the system's sensitivity, enabling the operation of photovoltaic power plants to be made more robust in the face of dynamic changes in grid demand.**

Keywords **- Inverter Control, Parametric Analysis, Photovoltaic Systems, Relative Stability, Root Locus, Transient Response.**

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID104

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

I. INTRODUCCIÓN

Las redes eléctricas de todo el mundo han experimentado una transformación significativa, caracterizada por una mayor penetración de la generación distribuida renovable (Golpîra et al., 2021). La integración exitosa de las FER (Fuentes de Energía Renovables) distribuidas requiere un mayor nivel de visibilidad (y controlabilidad) de los inversores. Se necesita un nivel mínimo de rendimiento durante las perturbaciones, lo que a su vez requiere conocimiento de las características dinámicas del sistema y del comportamiento de las FER distribuidas.

Los estudios de sensibilidad y las técnicas de análisis basadas en datos son de especial interés, ya que pueden complementar la información sobre el comportamiento del sistema, por ejemplo, para comprender los patrones dinámicos que surgen de la integración de nueva generación eólica y fotovoltaica. (Golpîra et al., 2021).

Por ello, la rápida penetración de las fuentes de energía renovables y los sistemas de generación distribuida ha impulsado la conexión de inversores a la red eléctrica. Esto implica que los dispositivos conectados a la red que se utilizan en los sistemas de generación distribuida deben diseñarse y controlarse cuidadosamente para lograr un rendimiento aún mejor que el de las centrales eléctricas convencionales a las que sustituyen (Teodorescu et al., 2011).

Los inversores conectados a la red, inherentemente asociados a las FER, presentan una alta sensibilidad a variaciones en los parámetros del controlador, lo que puede comprometer la estabilidad del sistema (Firdaus et al., 2017). Por ello, estudios paramétricos detallados (donde se analiza el efecto de cada parámetro de manera individual) son esenciales para garantizar la robustez del control ante perturbaciones y condiciones variables de operación (Chakraborty et al., 2025).

Existen diferentes investigaciones y estudios que analizan estrategias de control avanzadas para mejorar la respuesta dinámica de un inversor; por ejemplo, Zhou et al. 2021; evalúan las capacidades de estimación y rechazo de disturbios mediante funciones de transferencia y análisis en el dominio de la frecuencia. Además, hay propuestas de métodos avanzados para mejorar la respuesta dinámica y la robustez en el control de inversores, como el algoritmo de eliminación de polos dominantes que presentan Quan et al. 2020.

Sin embargo, una técnica clásica que destaca por su capacidad para interpretar la sensibilidad de un sistema de control es el Lugar Geométrico de las Raíces (LGR). En este trabajo, el LGR no se construye de forma continua variando una única ganancia, sino que se emplean sus bases conceptuales como marco de análisis para interpretar el desplazamiento de los polos en lazo cerrado, los cuales se obtienen mediante un barrido paramétrico discreto de las ganancias del controlador PI. Este enfoque permite mejorar el amortiguamiento del sistema sin recurrir a algoritmos computacionales complejos, manteniendo la esencia interpretativa del LGR. Estudios previos, como los de Feng et al. (2013), de Jadhav et al. (2015) y de De Paiva et al. (2009), han demostrado la utilidad del LGR para identificar parámetros críticos y orientar el ajuste de controladores.

Este estudio paramétrico tiene como propósito mejorar la respuesta dinámica de un inversor trifásico conectado a la red (Figura 1). Específicamente, se analiza el lazo de corriente *Iq*, utilizando mapas de polos-ceros para mostrar el desplazamiento de los polos dominantes e identificar cómo las ganancias proporcional (k_p) e integral (k_i) afectan el comportamiento del sistema. La perturbación considerada es la conexión súbita de una carga trifásica de 30 kW (Figura 2), que demanda corriente adicional de la central fotovoltaica y de la red, simulando un evento real que puede excitar modos transitorios no deseados.

La metodología utilizada en este desarrollo es similar a la empleada por Mao et al. (2014), que determina rangos óptimos de parámetros, los cuales aseguran estabilidad y buen rendimiento del inversor.

Figura 1
Topología del sistema eléctrico

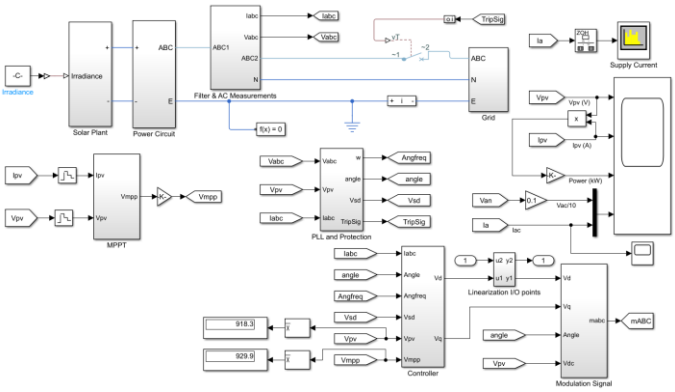
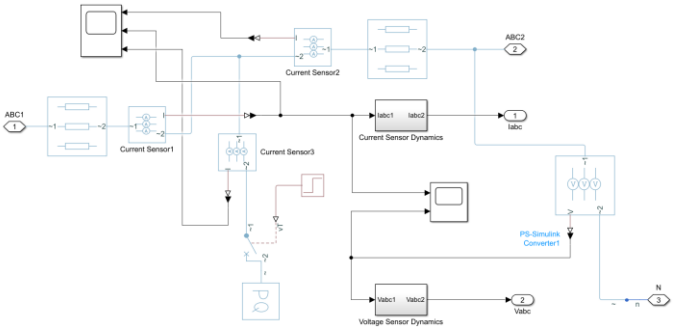


Figura 2
Conexión de una carga trifásica



La simulación se realiza en modo conectado a la red con irradiancia constante (1000 W/m²). Una vez alcanzado el estado estable (aproximadamente a los 6 segundos), se conecta la

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID104

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

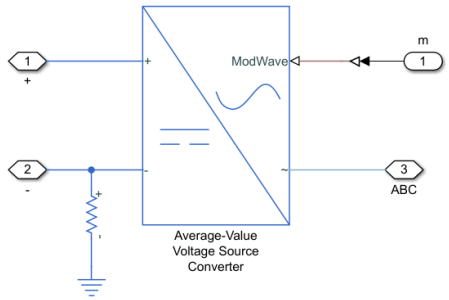
carga y se observa la respuesta del control ante el transitorio, hasta alcanzar un nuevo estado estable. Este procedimiento se repite para cada combinación de ganancias evaluada.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Modelo del inversor

El modelo promedio del inversor muestra la dinámica de los valores promedio de las variables, ya que los compensadores y filtros en un sistema de control de lazo cerrado suelen presentar características de paso bajo y no reaccionan a los componentes de alta frecuencia. Un modelo promediado también nos permite describir la dinámica del convertidor en función de la señal moduladora. Se utilizó el bloque del inversor promedio *Average-Value Model* de la librería Simscape (Figura 3) que representa la dinámica fundamental del convertidor mediante funciones de transferencia de valor medio, eliminando las armónicas de conmutación de alta frecuencia. Este bloque utiliza señales de modulación para calcular el voltaje promedio que el convertidor entrega en cada ciclo de conmutación.

Figura 3
Bloque del modelo de valor promedio



Las ecuaciones (1) y (2) describen la dinámica de las corrientes del convertidor en el marco de referencia dq

$$L\frac{di_d}{dt} = -Ri_d + \omega Li_q + (v_{id} - v_d) \quad (1)$$

$$L\frac{di_q}{dt} = -Ri_q - \omega Li_d + (v_{iq} - v_q) \quad (2)$$

donde L y R son la inductancia y resistencia del filtro, respectivamente. Las corrientes en el marco de referencia dq están representadas como i_d e i_q, los voltajes generados por el inversor son v_{id} y v_{iq}; v_d y v_q son los voltajes en el punto de conexión y ωLi_d, ωLi_q son los términos de acoplamiento cruzado.

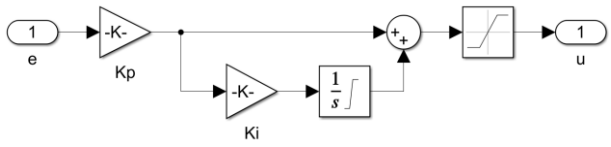
Este es un sistema de etapa única sin convertidor DC-DC, lo que hace que la estabilidad del bus de corriente continua dependa directamente del desempeño del control del voltaje.

La estructura del controlador está formada por controladores PI (Proporcionales-Integrales) que son ampliamente utilizados en los inversores conectados a la red para seguir una corriente de referencia de modo que se pueda inyectar una corriente deseada a la red; la estructura del controlador PI utilizado dentro del control del inversor analizado en este estudio se muestra en la Figura 4. La ecuación (3) representa la función de transferencia de un controlador PI típico.

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3)$$

donde K_p y K_i son las ganancias proporcional e integral, respectivamente.

Figura 4
Controlador PI utilizado dentro del control del inversor



La estructura del control del inversor tiene dos lazos independientes:

- **Lazo del eje d:** encargado de regular la magnitud del voltaje V_d (Figura 5).
- **Lazo del eje q:** encargado de mantener V_q en su referencia (Figura 6), asegurando la estabilidad ante perturbaciones.

Figura 5
Lazo de control Id

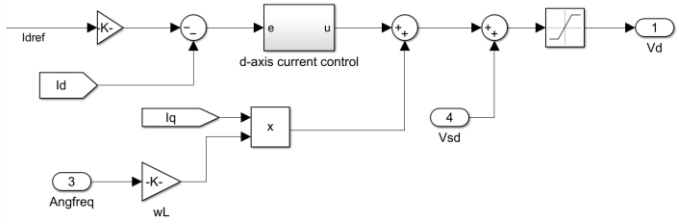
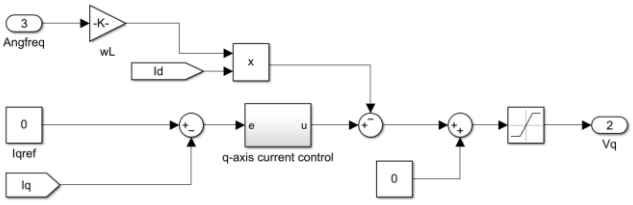


Figura 6
Lazo de control Iq



Se utilizan dos controladores PI para regular las corrientes I_d e I_q, de acuerdo con la señal de referencia I_{d_ref} (señal de salida del control de voltaje) e I_{q_ref}, que se comparan con las señales de $I_{d,q}$ medidas con referencia a la corriente trifásica I_{abc} de la red eléctrica, para obtener las señales de V_d y V_q respectivamente.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID104

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Para que el lazo de control de V_q no se vea afectado por cambios en I_d y viceversa, se suman términos de compensación proporcionales ωL.
La señal de control final que va al bloque *Average-Value Model* se representa con las ecuaciones (4) y (5).

$$v_{id}^{*} = v_{id} - \omega L i_q + v_{sd} \quad (4)$$

$$v_{iq}^{*} = v_{iq} + \omega L i_d \quad (5)$$

Esto permite que el sistema se vea como dos plantas lineales de primer orden independientes (Yazdani, A, et al., 2010).

Se utiliza un PLL (Phase-Locked Loop) para proporcionar la información de fase de la tensión de la red, que es necesaria para transformar las corrientes de la red en sus componentes del marco de referencia dq y luego transformar la señal de control de tensión de vuelta al marco original abc (Figuras 7 y 8). Esta etapa forma una interfaz entre el algoritmo de control de voltaje y la etapa de potencia, garantizando que el inversor replique las componentes de los ejes d y q, en las terminales de corriente alterna del sistema.

Figura 7
Modulación de la señal

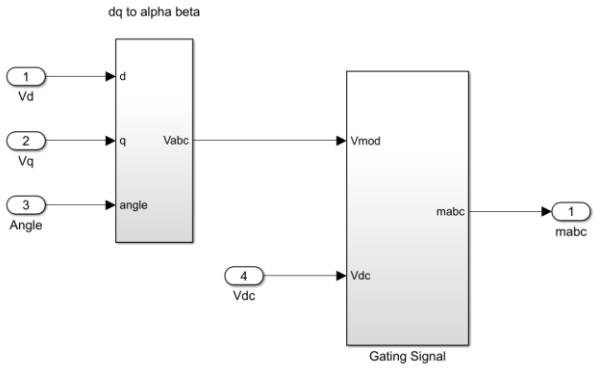
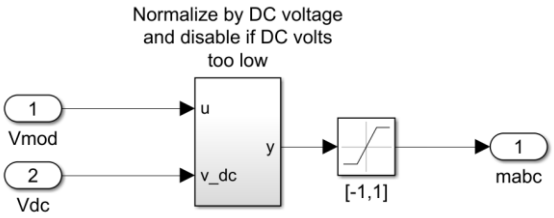


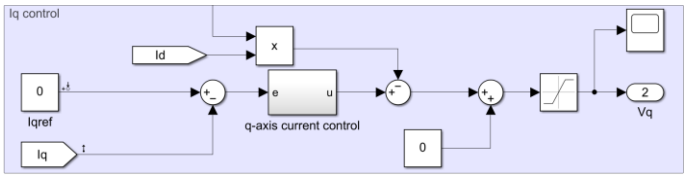
Figura 8
Regulación del voltaje CD



2.2 *Metodología de linealización y estudio paramétrico*

Debido a que el lazo de control de la corriente I_q es el más afectado durante la conexión de la carga, la planta se linealizó en este punto, Figura 9. Se utilizó la herramienta Model Linealizer de MATLAB/Simulink para obtener el modelo lineal del sistema. Para ello, se definió un punto de operación en el lazo de control de corriente I_q que controla el voltaje V_q, donde se definieron las señales de entrada I_{q_ref} y de salida I_q como referencia para la aplicación de la simulación. El software aplica una pequeña perturbación en el punto especificado para extraer una función de transferencia linealizada que representa la dinámica del inversor en ese régimen.

Figura 9
Identificación de las señales de referencia



Para evaluar la eficacia del ajuste de los valores de las ganancias, se definió una métrica basada en la estabilidad relativa y la ubicación de las raíces:

- **Indicador en el dominio del tiempo:** Se utiliza la reducción porcentual del sobreimpulso transitorio en la corriente del eje q. Un sobreimpulso menor indica un control de voltaje más robusto, ya que el sistema absorbe las perturbaciones de la carga con menor oscilación.
- **Indicador en el dominio de la frecuencia:** distancia entre el cero dominante y el polo dominante. En el "Mejor Caso", esta cercanía o distancia reduce el residuo de la respuesta transitoria, forzando al sistema a comportarse como uno de primer orden aun cuando es de segundo orden.
- **Desplazamiento de polos dominantes:** Se identifica el polo dominante como aquel cuya parte real está más próxima al eje imaginario del plano complejo *s* o más cercano al círculo unitario en el plano discreto *z*, es decir, es el que determina la velocidad de convergencia del sistema. Este polo representa el modo más lento y, por tanto, el que más influye en la respuesta transitoria. Se monitorea la trayectoria de los polos dominantes respecto al círculo unitario. Un polo más cercano al origen en el plano discreto garantiza una convergencia más rápida hacia el estado estable.

En sistemas lineales, el Lugar Geométrico de las Raíces (LGR) es una herramienta conceptual que permite interpretar cómo la ubicación de los polos de lazo cerrado se relaciona con la respuesta transitoria (Ogata, 2010). Si bien el LGR clásico construye trayectorias continuas al variar una ganancia multiplicativa, en este trabajo se emplea su fundamento conceptual para analizar el desplazamiento de los polos a partir de un barrido paramétrico discreto de las ganancias k_p y k_i. Para ello, se linealiza el modelo en un punto de operación (Figura 9) y se calculan los polos en lazo cerrado únicamente para los valores discretos de ganancia definidos en la Tabla 1. A partir de estos puntos, se observa la tendencia de movimiento de los polos dominantes y se correlaciona con la respuesta temporal. De esta forma, el LGR actúa como una guía de interpretación –no como una herramienta de trazado continuo– permitiendo analizar cualitativamente aspectos como el amortiguamiento (polos con parte real más negativa), la

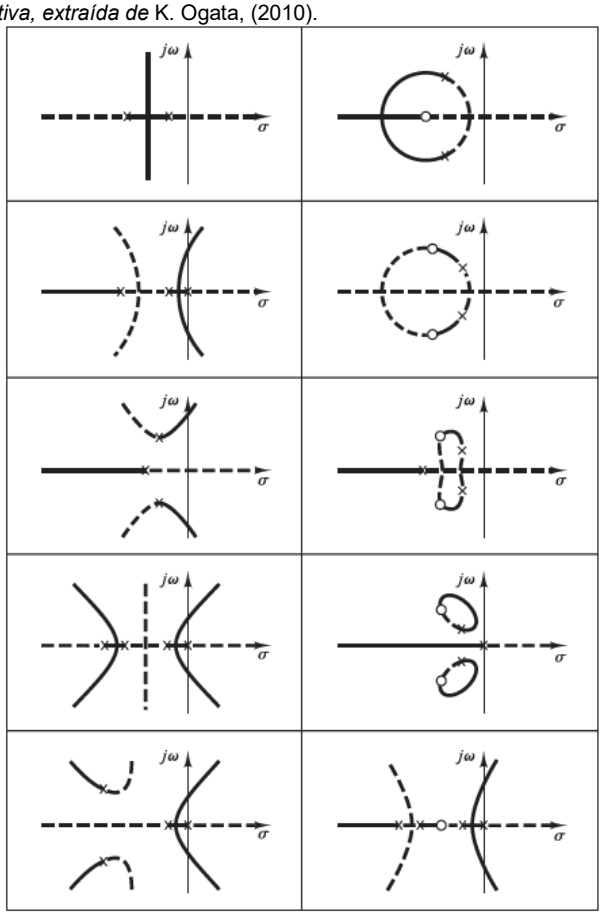
Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID104

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

presencia de oscilaciones (polos cercanos al eje imaginario) o la velocidad de respuesta (polos cercanos al origen). Tal como expone Ogata (2010) y se ilustra en la Figura 10, el LGR permite visualizar la evolución progresiva de la estabilidad y el amortiguamiento. A través de este enfoque analítico, se identificó una región de operación donde la proximidad entre polos y ceros dominantes reduce el residuo del modo transitorio, optimizando el amortiguamiento del sistema sin recurrir a algoritmos computacionales complejos.

Figura 10

Trayectoria de las raíces de sistemas con realimentación negativa y positiva, extraída de K. Ogata, (2010).



En el control de inversores, donde la dinámica suele ser dominada por modos de segundo orden asociados al lazo de corriente y al lazo de tensión, el LGR resulta particularmente valioso porque permite analizar cómo el amortiguamiento, la frecuencia natural y la estabilidad relativa evolucionan al modificar las ganancias del controlador. Además, la presencia del controlador PI introduce un cero real que modifica la ubicación de las raíces y puede mejorar o empeorar la respuesta transitoria (Ogata, K. 2010). Esta visualización facilita comprender cómo los ajustes en k_p y k_i influyen en la respuesta transitoria del inversor y en su capacidad para rechazar perturbaciones.

La conexión súbita de una carga trifásica introduce un escalón en la demanda de corriente, lo que excita los modos dinámicos del lazo de control de I_q. Considerando la afectación de las variables en el sistema, empleando los principios del LGR es posible interpretar, para cada combinación de ganancias evaluada, si el sistema presentará sobreimpulso (polos con bajo amortiguamiento), si habrá oscilaciones (polos cercanos al eje imaginario), si la respuesta será lenta (polos muy cercanos al origen), (Figura 11). Esta interpretación facilita entender cómo las ganancias k_p y k_i modifican la ubicación de polos y ceros dominantes y por qué su ajuste afecta la dinámica del sistema (Figura 12). Por ejemplo, la ganancia proporcional desplaza las raíces hacia la izquierda en el plano complejo *s*, aumentando la rapidez de respuesta del sistema, y la ganancia integral introduce un polo en el origen y un cero real, lo que puede mejorar el seguimiento de la señal de referencia en estado estacionario, pero puede reducir el amortiguamiento si el cero no está bien ubicado.

Figura 11

Respuesta de un sistema de segundo orden en función del coeficiente de amortiguamiento, extraída de N. S. Nise, 2011.

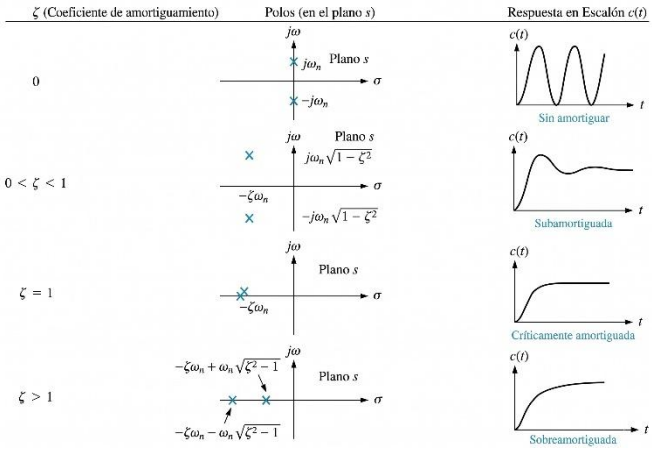
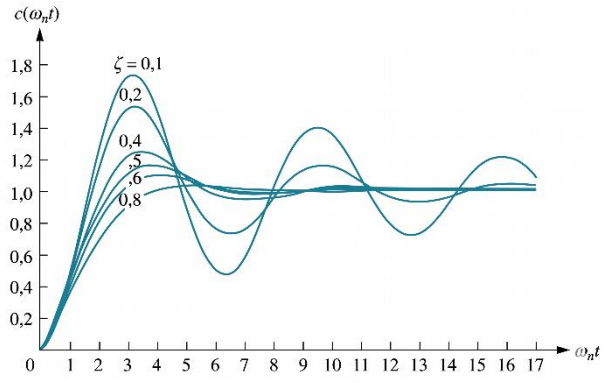


Figura 12

Gráfica de la respuesta de un sistema de segundo orden en función del coeficiente de amortiguamiento



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID104

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El caso propuesto considera que el sistema fotovoltaico recibe una irradiancia constante de $1{,}000\,W/m^2$, en donde el algoritmo del MPPT (Maximum Power Point Tracking) suministra la máxima potencia, a partir de los 6 segundos transcurridos. En este punto se toma un *snapshot* indicándole a la herramienta de simulación el momento en que se debe linealizar el sistema para extraer la función de transferencia equivalente y el mapa de Polos-Ceros en el plano discreto.

Para evaluar la sensibilidad del lazo de control de I_q ante variaciones de K_p y K_i se realizó un barrido uno a uno en un rango del $\pm 40\%$ respecto a los valores originales (o nominales) del sistema a simular ($Kp_{nominal} = 30.016$, $Ki_{nominal} = 29.6166$). Primero se varió K_i manteniendo K_p nominal, observándose cambios moderados en la respuesta. El valor $K_i = Ki_{nominal} + 10\%\,(32.57826)$ mostró el mejor comportamiento, por lo que se fijó para el siguiente paso. Luego se varió K_p desde -40% hasta $+40\%$ con K_i fija en 32.57826. La sensibilidad fue mucho mayor: el sobreimpulso de I_q disminuyó notablemente al aumentar K_p. La combinación $K_p = Kp_{nominal} + 40\%\,(40.0223)$ con $K_i = 32.57826$ se identificó como el mejor caso, mientras que $K_p = Kp_{nominal} - 40\%\,(18.0096)$ con la misma K_i fue el peor caso. La Tabla 1 resume todas las combinaciones evaluadas en este estudio.

Realizando un análisis fundamentado en los principios del LGR, se definieron dos escenarios críticos para la comparación: el "*Peor Caso*", caracterizado por una sintonía que provoca una separación significativa entre polos y ceros dominantes, y el "*Mejor Caso*", donde se logra una mayor proximidad entre ellos. Esta proximidad reduce el residuo del modo transitorio, contribuyendo a la disminución del sobreimpulso y a una respuesta con mejor amortiguamiento relativo.

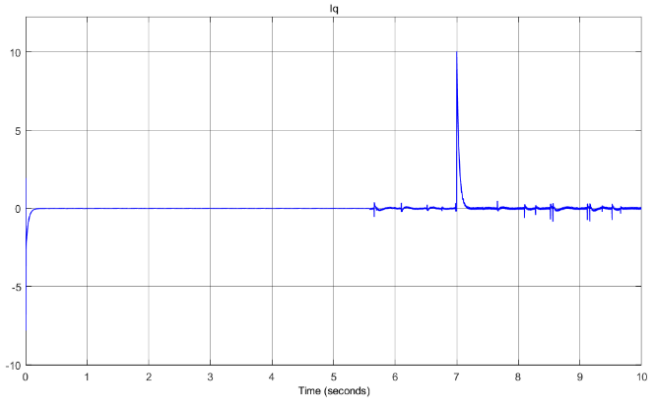
Tabla 1
Valores de las ganancias en cada escenario de simulación

Escenario	K_p	K_i	*Comentario*
Nominal	30.0160	29.6166	Punto de referencia
$K_i - 40\%$	30.0160	17.76996	-
$K_i - 30\%$	30.0160	20.73162	-
$K_i - 20\%$	30.0160	23.69328	-
$K_i - 10\%$	30.0160	26.65494	-
$K_i + 10\%$	30.0160	32.57826	-
$K_i + 20\%$	30.0160	35.53992	-
$K_i + 30\%$	30.0160	38.50158	-
$K_i + 40\%$	30.0160	41.46324	-
$K_p - 40\%$	18.0096	32.57826	Peor Caso
$K_p - 30\%$	21.0112	32.57826	-
$K_p - 20\%$	24.0128	32.57826	-
$K_p - 10\%$	27.0144	32.57826	-
$K_p + 10\%$	33.0176	32.57826	-
$K_p + 20\%$	36.0192	32.57826	-
$K_p + 30\%$	39.0207	32.57826	-
$K_p + 40\%$	42.0223	32.57826	Mejor Caso

La conexión de la carga trifásica se realiza a los 7 segundos (después de que el sistema se estabiliza), y monitoreando la respuesta de la señal de I_q después de esa perturbación, se observa un sobreimpulso con una duración aproximada de 0.2 segundos. Esta perturbación afecta directamente a la componente V_q de salida al inversor.

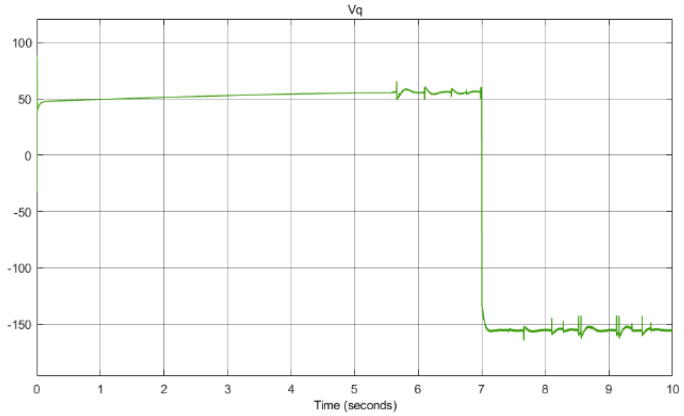
En las gráficas de las señales en el "Peor Caso" se identifica un incremento en el valor del sobreimpulso transitorio donde $I_q = 10.05A$, además se muestra una señal perturbada y con oscilaciones.

Figura 13
Gráfica de la respuesta de la señal Iq en el "Peor Caso"



Afectando también la respuesta de la señal de V_q que se muestra distorsionada y decrementa su valor hasta $-158V$ sin llegar a estabilizarse después del transitorio (Figura 14).

Figura 14
Gráfica de la respuesta de la señal Vq en el "Peor Caso"



Además, hay una afectación en la corriente trifásica I_{abc} después de la conexión de la carga, ya que se estabiliza lentamente (Figura 15).

Por otra parte, se puede apreciar una mejora en la respuesta del control al ver las señales en el "Mejor Caso" donde el sobreimpulso transitorio se reduce $I_q = 4.901A$ y la señal se aprecia estable y sin oscilaciones (figura 16).

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID104

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 15
Gráfica de la respuesta de la corriente trifásica Iabc en el "Peor Caso"

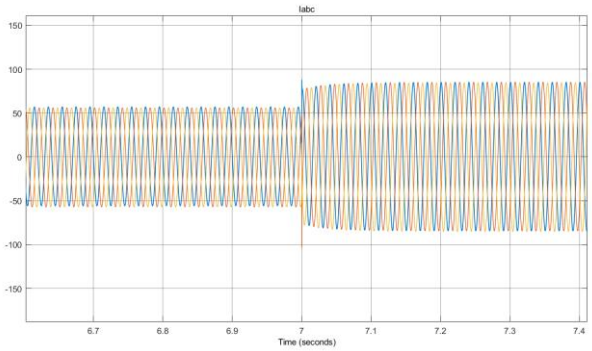
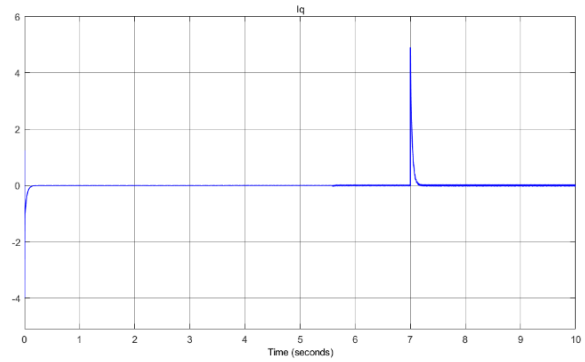
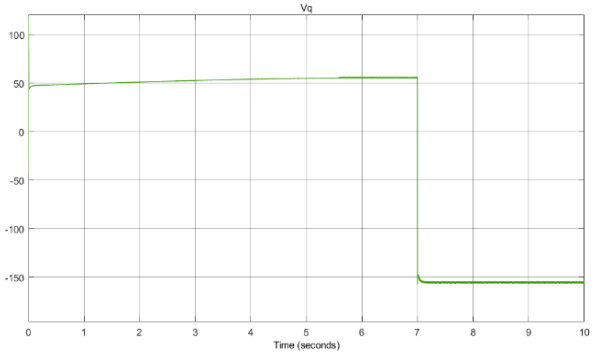


Figura 16
Gráfica de la respuesta de la señal Iq en el "Mejor Caso"



De la misma manera, como se muestra en la Figura 17, el impacto en el decremento de la magnitud la señal I_q se ve favorecido $V_q = -156V$ y muestra una respuesta nítida y estable.

Figura 17
Gráfica de la respuesta de la señal Vq en el "Mejor Caso"



El análisis de las diferencias en las gráficas temporales de las señales (Figuras 13 y 16) evidencia la reducción del sobreimpulso transitorio en el eje q en un 51.24%.
Estas evidencias se pueden comparar al observar la trayectoria de los polos en el plano discreto presentado en las Figuras 18 y 19, junto con las gráficas de las Figuras 20 y 21, que muestran las diferentes posiciones de los polos de acuerdo con los valores de las ganancias.

Figura 18
Mapa Polos-Ceros "Peor Caso"

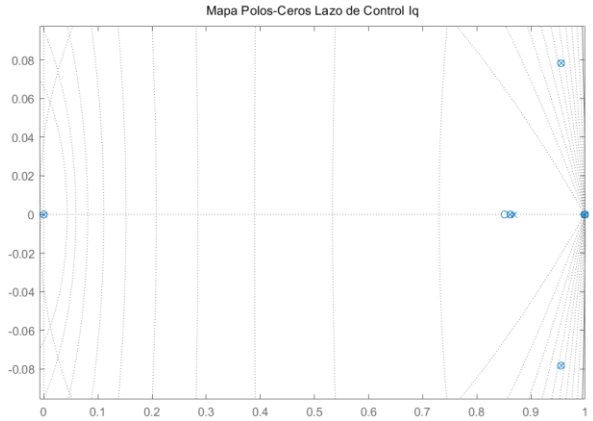
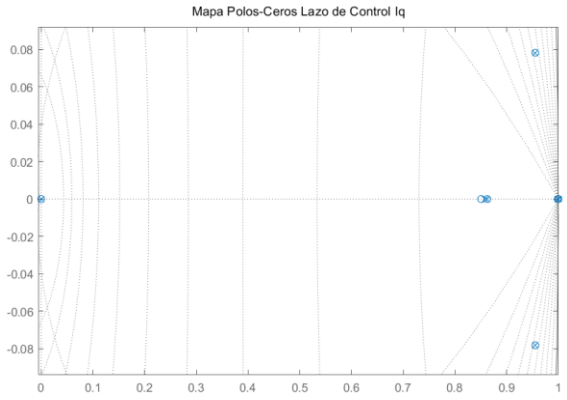


Tabla 2
Ubicación de Polos-Ceros en el "Peor Caso"

Polo	*ζ*	*(rad/s)*	*Cero*	*ζ*	*(rad/s)*
[0.862, 0]	1.0	29.6	**[0.851, 0]**	**1.0**	**32.3**
[0.868, 0]	**1.0**	**28.3**	[0.862, 0]	1.0	29.6
[0.955, +0.0782i]	0.46	18.4	[0.955, +0.0782i]	0.46	18.4
[0.955, -0.0782i]	0.46	18.4	[0.955, -0.0782i]	0.46	18.4
[0.999, 0]	1.0	0.298	[0.999, 0]	1.0	0.298
[1, 0]	1.0	$3.81e^{-11}$	[1, 0]	1.0	$3.78e^{-11}$

En las Tablas 2 y 3 se identifica el modo dominante del sistema en cada caso, marcado con color azul. Digamos que en el "*Peor Caso",* la separación entre el polo y el cero es máxima; esto impide una mitigación efectiva del sobreimpulso. También sabemos que es un modo lento (baja frecuencia), esto permite que el error crezca antes de ser corregido, lo que resulta en un sobreimpulso más pronunciado en I_q.

Figura 19
Mapa Polos-Ceros "Mejor Caso"



Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID104

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Tabla 3
Ubicación de Polos-Ceros en el "Mejor Caso"

Polo	*ζ*	*(rad/s)*	*Cero*	*ζ*	*(rad/s)*
[0.858, 0]	**1.0**	**30.6**	**[0.85, 0]**	**1.0**	**32.4**
[0.862, 0]	1.0	29.6	[0.862, 0]	1.0	29.6
[0.955, +0.0782i]	0.46	18.4	[0.955, +0.0782i]	0.46	18.4
[0.955, -0.0782i]	0.46	18.4	[0.955, -0.0782i]	0.46	18.4
[0.999, 0]	1.0	0.298	[0.999, 0]	1.0	0.298
[1, 0]	1.0	$2.07e^{-11}$	[1, 0]	1.0	$2.08e^{-11}$

Al contrastar el mapa de polos-ceros del "*Mejor Caso*" con el análisis previo, la posición de los polos revela exactamente esa mejora drástica en el desempeño del control. En este caso, existe un desplazamiento del polo dominante hacia el origen; esto incrementa la velocidad de respuesta del sistema, permitiendo que el controlador reaccione más rápido ante el escalón que ocasiona la conexión de la carga. Al reducir la distancia entre el polo y el cero a menos de la mitad, se produce una cancelación casi total del modo transitorio.

Figura 20
Movimiento de los polos dominantes para diferentes valores de Ki

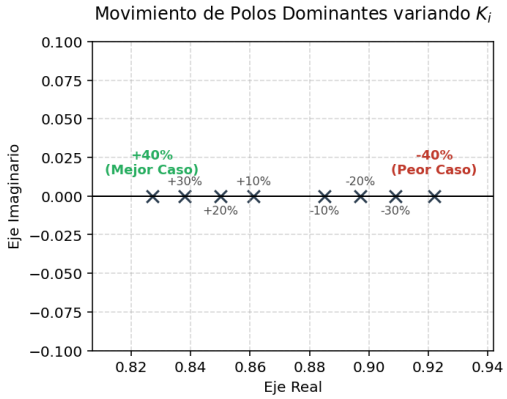
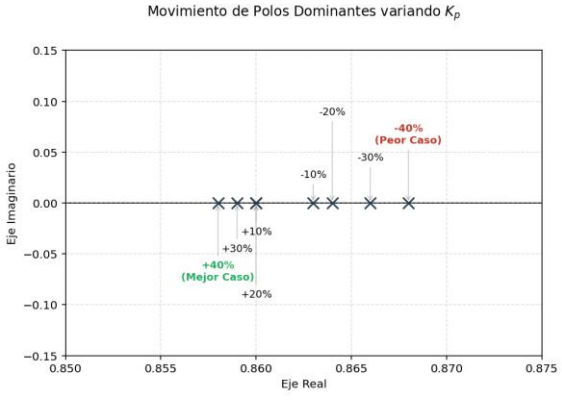


Figura 21
Movimiento de los polos dominantes para diferentes valores de Kp



Aquí se observa que la respuesta dinámica del sistema frente a perturbaciones de carga está intrínsecamente ligada a la ubicación de las raíces. Con esto se identifican algunos aspectos que justifican la optimización alcanzada; el estudio paramétrico demostró que el aumento controlado de las ganancias de control desplaza los polos dominantes hacia el origen.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mediante las simulaciones confirman que la optimización del desempeño transitorio de inversores trifásicos conectados a la red no se limita únicamente a garantizar la estabilidad, sino que requiere comprender cómo las ganancias del controlador modifican la dinámica del sistema. El estudio paramétrico realizado muestra que la reducción del sobreimpulso en la corriente I_q (del 51.2% en su valor pico) está asociada al desplazamiento de los polos dominantes hacia el origen en el plano discreto, inducido por el aumento de la ganancia proporcional K_p en un 40% (con un incremento del 10% en K_i).

En particular, la variación sistemática de K_i y K_p permitió identificar cómo cada parámetro afecta la ubicación de los polos y cómo estos desplazamientos se traducen en mejoras o degradaciones del comportamiento transitorio. El análisis se apoyó en los principios conceptuales del Lugar Geométrico de las Raíces como marco de interpretación, no en la construcción de trayectorias continuas. A partir de los polos calculados en puntos discretos (barrido paramétrico), se observó que la proximidad entre polos y ceros dominantes reduce el residuo del modo transitorio, lo que contribuye a una respuesta más amortiguada. No se logró una cancelación exacta, pero la cercanía obtenida es suficiente para atenuar las oscilaciones.

En conjunto, este estudio valida que la combinación de un estudio paramétrico estructurado y el uso interpretativo del LGR constituye una estrategia eficaz para mejorar la respuesta dinámica del lazo de corriente I_q. La metodología aplicada permitió cuantificar la reducción del sobreimpulso y comprender cómo las variaciones en las ganancias modifican la dinámica del sistema. Como limitación principal, los resultados se obtienen en simulación con condiciones ideales (irradiancia constante, red rígida); se recomienda como trabajo futuro la validación experimental y el análisis de robustez ante variaciones en la impedancia de red y en la irradiancia solar.

V. AGRADECIMIENTOS

R. G. Camacho Sifuentes agradece a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico recibido para el estudio del posgrado. También a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de la Laguna por las facilidades brindadas para la conclusión de este proyecto.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

VI. REFERENCIAS

Chakraborty, S., Umathe, B., y Wang, J. (19-23 de octubre del 2025). IEEE Energy Conversion Conference Congress and Exposition (ECCE). Control Parameter Sensitivity Study for Inverter-Based-Resource Dominated Grids: A Small Signal Stability Approach and Framework. DOI: https://doi.org/10.1109/ECCE58356.2025.11259859

De Paiva, E.P., Vieira, J.B. Jr., De Freitas, L.C., Farias, V.J., y Alves Coelho, E.A. An Improved Power Controller for a Single-Phase Grid-Connected Inverter with Root Locus Analysis. Electrónica de Potencia, Vol. 14, No.1. 2009. https://doi.org/10.18618/REP.2009.1.017023.

Feng, W., Guan, Y., Yibo, W., y Xu, H. Stability Analysis of Hydraulic-PV Hybrid Microgrid Based on Small-signal Dynamic Model. International Conference on Electrical Machines and Systems, 26–29 October 2013, Busan, Korea. https://doi.org/10.1109/ICEMS.2013.6754454.

Firdaus, A., Mishra, S., y Bhende, C.N. Modelling a Droop-Controlled Multi PV Inverter System to Study Effects of System Parameters on Oscillatory Modes. Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT), 24 – 26 October, 2017. https://doi.org/10.1109/ACEPT.2017.8168580.

Golpîra, H., Román-Messina, A., y Bevrani H. (2021) . Renewable Integrated Power System Stability and Control. John Wiley & Sons, Inc.

Jadhav, S., y George, S. Desing of PI Controller for Grid-connected DG unit using Root Locus Technique. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Volumen 3, 01, 2015. https://www.ijert.org/research/design-of-pi-controller-for-grid-connected-dg-unit-using-root-locus-technique-IJERTCONV3IS01046.pdf

Mao, M., Dong, Z., Dong, Y., Huang, H., Chang, L. Parameters Sensitivity Analysis of the Controller Based on Unified Control Strategy in a Photovoltaic Microgrid. IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 24 – 27 Junio, 2014. https://doi.org/10.1109/PEDG.2014.6878626.

MathWorks. (2026). Three-phase grid-connected PV system (Sandscape Electrical example). Retrieved February 23, 2026. https://la.mathworks.com/help/sps/ug/three-phase-grid-connected-in-pv-system.html.

Molina, M.G., Espejo, E.J. Modeling and Simulation of Grid-connected Photovoltaic Energy Conversion Systems. International Journal of Hydrogen Energy (2013). http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.048 .

Nise, N. S. (2011). Control systems engineering (6.ª ed.). John Wiley & Sons.

Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna (5.ª ed.). Prentice Hall.

Quan, X. Improved Dynamic Response Desing for Proportional Resonant Control Applied to Three-Phase Grid-Forming Inverter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 68, 10, (9919 – 9930) Octubre 2021. https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3021654.

Teodorescu, R., Liserre, M. y Rodríguez Cortés, P. (2011). Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. John Wiley & Sons, Ltd.

Yazdani, A., Iravani, R. (2010). Voltage-Source Converters in Power Systems. John Wiley & Sons, Inc. DOI:10.1002/9780470551578 .

Zhou, X., Liu, Q., Ma, Y., Li, W., y Xie, B. A Modified LADRC-Based DC-Link Voltage Controller for Photovoltaic Grid-connected Inverters. Electronics, 10, 877, 2021. https://doi.org/10.3390/electronics10080877.

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización [Conceptualization]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruíz Ponce
2	Curación de datos [Data curation]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
3	Análisis formal [Formal analysis]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
5	Investigación [Investigation]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruíz Ponce
6	Methodología [Methodology]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
7	Administración del proyecto [Project administration]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
8	Recursos [Resources]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes
9	Software [Software]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruíz Ponce
10	Supervision [Supervision]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruíz Ponce
11	Validación [Validation]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
12	Visualización [Visualization]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruíz Ponce
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruíz Ponce
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruíz Ponce

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID104

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Evaluación del Impacto del Servicio al Cliente en la Fidelización de Usuarios: Un Análisis del Soporte Técnico Remoto en Entornos de Manufactura Avanzada

Evaluating the Impact of Customer Service on User Loyalty: An Analysis of Remote Technical Support in Advanced Manufacturing Environments

Ochoa-Corona, Y.S.[1] ✉; Ramos-Ochoa, O.F.[2]; Ruiz-Arroyo, I.[3]; Martínez-Rodríguez, U.[4]

Datos de Adscripción:

[1]✉Ochoa Corona, Yisvi Saray
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de San Pedro de las Colonias. San Pedro de las Colonias, Coahuila. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/0134he436
yisvi.ochoa@tecsanpedro.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7166-0594

[2] Ramos Ochoa, Oscar Fabián
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de San Pedro de las Colonias. San Pedro de las Colonias, Coahuila. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/0134he436
oscar.ramos@tecsanpedro.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-6469-6410

[3] Ruiz Arroyo, Idalia
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de la Laguna. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/00xbw4a70
iruiza@lalaguna.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7288-2853

[4] Martínez Rodríguez, Ulises
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de la Laguna. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/00xbw4a70
umr.user@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3985-0526

Resumen **- En la industria de software para manufactura avanzada y aeroespacial, el soporte técnico remoto (STR) es decisivo para garantizar la productividad del usuario. Esta investigación evalúa las causas del desaprovechamiento del STR y su impacto directo en la fidelización del cliente. La metodología adoptó un enfoque mixto en dos fases: un estudio exploratorio-cualitativo validado por Alfa de Cronbach (α=0.8475) y analizado mediante Diagrama de Pareto; seguido de un modelo de regresión lineal simple para determinar la relación entre la atención técnica y la renovación de contratos. Los resultados mostraron un consenso absoluto respecto a la alta criticidad de los datos de metrología, identificando los estrictos protocolos de ciberseguridad industrial como la principal barrera de acceso. El análisis de Pareto reveló que el 83.8% del desaprovechamiento se concentra en dos causas: el desconocimiento de los alcances del servicio (48.5%) y la falta de claridad en los canales de comunicación (35.3%). Por su parte, la regresión lineal confirmó una capacidad explicativa sobresaliente (R2=88.62%), demostrando que por cada cuatro casos atendidos, la tasa de retención se incrementa en una unidad. Se concluye que el STR no es un mero centro de costos reactivo, sino el motor proactivo principal para la fidelización en estrategias de servitización. Para maximizar su adopción, el proveedor debe homologar sus conexiones a estándares de ciberseguridad y optimizar la difusión del servicio.**

Palabras Clave **- Cliente, Evaluación, Fidelización, Impacto, Servicio, Soporte.**

Abstract **- In the advanced manufacturing and aerospace software industry, remote technical support (RTS) is critical to ensuring user productivity. This research evaluates the causes of RTS underutilization and its direct impact on customer loyalty. The methodology adopted a two-phase mixed-methods approach: an exploratory-qualitative study validated by Cronbach's Alpha (α=0.8475) and analyzed using a Pareto Chart; followed by a simple linear regression model to determine the relationship between technical support and contract renewals. The results showed absolute consensus regarding the high criticality of metrology data, identifying strict industrial cybersecurity protocols as the primary access barrier. The Pareto analysis revealed that 83.8% of the underutilization is concentrated in two main causes: lack of awareness regarding the service scope (48.5%) and a lack of clarity in communication channels (35.3%). Furthermore, the linear regression confirmed outstanding explanatory power (R2=88.62%), demonstrating that for every four tickets resolved, the retention rate increases by one unit. It is concluded that RTS is not merely a reactive cost center, but rather the primary proactive engine for customer loyalty within servitization strategies. To maximize its adoption, the provider must align its connections with cybersecurity standards and optimize service outreach.**

Keywords **- Customer, Evaluation, Impact, Retention, Service, Support.**

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID109

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

I. INTRODUCCIÓN

Desde siempre, las industrias, independientemente del ramo, se han preocupado por mantener sus estándares de competitividad; el panorama actual sigue siendo el mismo, pero con algunas variantes que permiten que además de centrarse en la entrega de un producto o servicio de calidad, reconocen que la excelencia en el servicio es una característica que no debe pasarse por alto, pues incide de manera directa en la fidelización de sus clientes, así lo refiere López (2016): "Para lograr estar presente en un mercado que es cada vez más competitivo las empresas no son viables sin una apropiada atención al cliente y sin brindar un soporte adecuado a los servicios que ofrece"

La presente investigación evalúa el impacto del servicio al cliente, definido por Vargas (2006) como: "El conjunto de aspectos relacionados con los clientes, intangible, variable, que se produce y consume a la vez y que no puede ser almacenado"; específicamente del soporte técnico a distancia en empresas que requieren o utilizan software especializado para sus equipos de medición; estas empresas de manufactura avanzada dependen no solo de la sofisticación de sus procesos y herramientas, sino también, de una precisión en el proceso de medición de sus piezas las cuales deben tener un margen de error casi inexistente; por ende, el software de medición se convierte en uno de los pilares que sostienen la garantía de calidad de sus productos. Sin embargo, la propia naturaleza de estas herramientas tecnológicas genera cierta dependencia hacia el servicio post venta, situando al soporte técnico a distancia como un componente estratégico para la continuidad operativa.

El soporte técnico remoto (STR), también conocido como soporte técnico a distancia, tiene varias ventajas entre las que destacan la inmediatez en la resolución de casos y la reducción de costos, aún así se observa una situación cotradictoria en el sector de manufactura avanzada: el desaprovechamiento de estos recursos por parte de los usuarios, mismo que representa una pérdida tanto para la empresa desarrolladora como para el cliente, ocultando factores críticos que deben ser identificados para optimizar la transferencia de conocimiento y la resolución de problemas en tiempo real.

Flores (2023) afirma que existen datos estadísticos que muestran que cuando un cliente utiliza un servicio, existe una posibilidad del 27% de que vuelva a utilizarlo y si el cliente regresa la probabilidad de fidelización aumenta hasta un 45%, es por esto que la empresa desarrolladora de software donde se llevó a cabo la presente invetigación, está interesada en conocer las causas o factores que limitan el aprovechamiento total y efectivo del soporte técnico a distancia que brinda y en segundo término, en establecer y validar la correlación existente entre la efectividad de dicho soporte y los índices de fidelización de los clientes a largo plazo.

Es importante mencionar que hoy en día, en la industria 4.0 surgen nuevos término dentro del ramo de manufactura avanzada, uno de ellos es la servitización explicada por Kamp (2016) de la siguiente manera: "Las empresas manufactureras no solamente tienden a ofrecer cada vez más propuestas de valor al mercado que integran una capa de servicios, sino que también buscan un mayor grado de interacción y complicidad entre el ofertante y el cliente", ello remite a entender la importancia de comunicación efectiva empresa-cliente puesto que, como señala Alcaide (2015): "La fidelización se sustenta en una muy eficaz gestión de las comunicaciones empresa-clientes". De este modo, el diálogo continuo, estructurado y supervisado no solo establece el vínculo comercial, sino que se convierte en la estrategia más importante para asegurar la lealtad del cliente en entornos industriales cada vez más competitivos.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Para llevar a cabo el estudio, el mismo se dividió en dos fases de acuerdo con los objetivos planteados: el primero de ellos es conocer e identificar los motivos del desaprovechamiento del soporte técnico remoto y, en segundo lugar, demostrar si existe una correlación entre la efectividad del soporte y la fidelización de los usuarios.

A continuación se muestran los detalles de ambas fases:

2.1 Fase 1: Identificación de causas y factores del desaprovechamiento del soporte técnico remoto.

El objetivo de esta primera parte del estudio es conocer las principales razones por las que existe una limitación en el uso del soporte técnico que ofrece la empresa de software especializado al momento de adquirir una licencia. Para ello, mediante un enfoque exploratorio cualitativo, una fuente primaria de datos y un muestreo por conveniencia, se llevó a cabo una encuesta dirigida a los líderes del área de calidad en una muestra de 68 industrias que actualmente cuentan con licencia activa y que nunca han solicitado asistencia remota.

2.2 Fase 2: Establecimiento de la correlación entre la efectividad del soporte y la fidelización del cliente.

Para cumplir con el segundo objetivo del estudio, se utiliza la aplicación de un modelo de regresión lineal simple para modelar matemáticamente la relación entre el STR a través del número de casos solicitados, atendidos y resueltos y el comportamiento del cliente a través de la frecuencia de renovación anual de sus licencias.

Se seleccionó la aplicación de esta técnica estadística porque, además de que permite analizar la relación entre dos variables, ayuda a predecir el comportamiento de las mismas y esto a su vez resulta importante para la toma de decisiones (Martínez, 2025).

Para el análisis de datos de ambas fases se utilizó el software estadístico Minitab 22.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID109

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de la Fase 1: Identificación de causas y factores del desaprovechamiento del soporte técnico remoto.

A. Encuesta

Las preguntas que contiene la encuesta están divididas en tres secciones: la primera, denominada "Barreras de infraestructura y seguridad", la segunda, denominada "Competencias técnicas y factor humano" y la tercera, denominada "Operación y procesos del servicio", además de poseer una pregunta abierta.

En la Tabla 1 se muestra la encuesta aplicada, evaluada con una escala de Likert de 5 puntos: (1 totalmente en desacuerdo, 2 en desacuerdo, 3 neutral, 4 de acuerdo y 5 totalmente de acuerdo).

Tabla 1

Encuesta de diagnóstico: uso de STR.

Barreras de infraestructura y seguridad
1. Las políticas de ciberseguridad de nuestra planta restringen o retrasan el uso de conexiones remotas con proveedores externos. 2. Compartir pantallas o datos de medición en tiempo real genera conflictos con los acuerdos de confidencialidad de nuestros proyectos.
Competencias técnicas y factor humano
3. El personal operativo prefiere resolver los desajustes del software de manera interna (prueba y error) antes que solicitar un caso de soporte remoto. 4. Considero que nuestro equipo de metrólogos requiere de mayor capacitación en el uso de la plataforma de asistencia a distancia para aprovecharla correctamente.
Operación y procesos del servicio
5. El proceso interno que debemos seguir en nuestra planta para solicitar soporte técnico externo es burocrático y desincentiva su uso. 6. Preferimos esperar una visita presencial (aunque tarde más) porque percibimos que el soporte remoto no soluciona de raíz los problemas complejos de medición.
Pregunta abierta
¿Cuál considera que es el principal obstáculo para que su equipo no utilice con mayor frecuencia el soporte técnico a distancia?

B. Validación del instrumento de medición.

La validación de la encuesta se realizó a través del alfa de Cronbach, definido como un coeficiente necesario para medir la confiabilidad de un instrumento, entiéndase como confiabilidad a la consistencia o estabilidad de una medida (Quero, 2010); dando como resultado un índice de 0.8475, lo que sostiene que los ítems son consistentes y, por ende, el instrumento tiene validez, al ser un valor mayor que el utilizado como referencia de 0.7. La figura 1 muestra los resultados obtenidos.

Figura 1

Validación de la encuesta de diagnóstico mediante Alfa de Cronbach.

Matriz de correlación

	PREG 1	PREG 3	PREG 4	PREG 5
PREG 3	0.603			
PREG 4	0.800	0.816		
PREG 5	0.653	0.602	0.836	
PREG 6	0.533	0.253	0.481	0.740

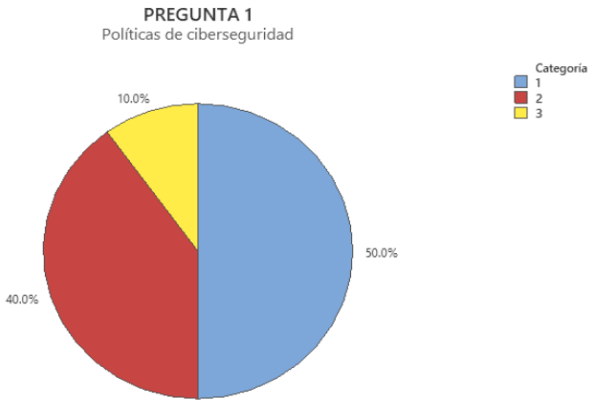
Contenido de la celda
Correlación de Pearson

C. Análisis descriptivo.

Posteriormente se llevó a cabo un estudio descriptivo de las respuestas que se obtuvieron de las seis preguntas iniciales. Los resultados son los siguientes:

Figura 2

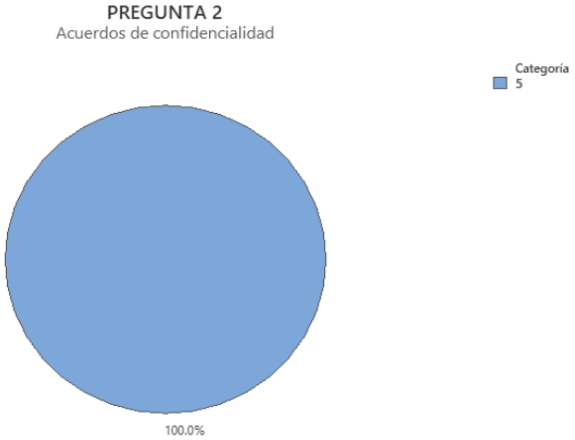
Resultados obtenidos de la pregunta 1: Las políticas de ciberseguridad de nuestra planta restringen o retrasan el uso de conexiones remotas con proveedores externos.



En la Figura 2 se observa que para el cuestionamiento: Las políticas de ciberseguridad de nuestra planta restringen o retrasan el uso de conexiones remotas con proveedores externos, el 50% de los encuestados respondieron estar totalmente en desacuerdo, el 40% en desacuerdo y el 10% tomaron una postura neutral ante dicha interrogativa.

Figura 3

Resultados obtenidos de la pregunta 2: Compartir pantallas o datos de medición en tiempo real genera conflictos con los acuerdos de confidencialidad de nuestros proyectos.

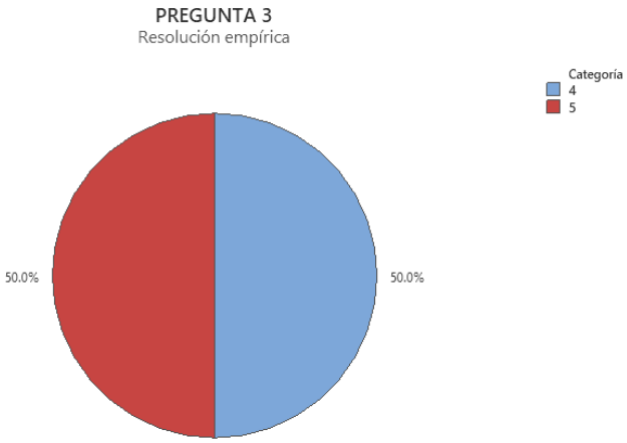


En la figura 3, se observa que para la pregunta: Compartir pantallas o datos de medición en tiempo real genera conflictos con los acuerdos de confidencialidad de nuestros proyectos, el 100% de los líderes de las áreas de calidad respondieron estar totalmente de acuerdo.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID109

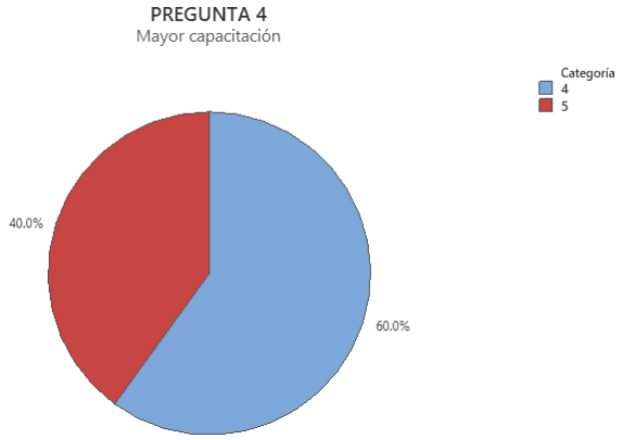
This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 4
Respuestas a la pregunta 3: El personal operativo prefiere resolver los desajustes del software de manera interna antes que solicitar un caso de soporte remoto.



En la figura 4 arriba mostrada, respecto a la pregunta: El personal operativo prefiere resolver los desajustes del software de manera interna (prueba y error) antes que solicitar un caso de soporte remoto; se observa que el 50% de los respondientes afirmaron estar de acuerdo y el otro 50% estuvieron totalmente de acuerdo.

Figura 5
Respuestas a la pregunta 4: Considero que nuestro equipo de metrólogos requiere de mayor capacitación en el uso de la plataforma de asistencia a distancia para aprovecharla correctamente.



En la figura 5, se muestra que para la premisa: Considero que nuestro equipo de metrólogos requiere de mayor capacitación en el uso de la plataforma de asistencia a distancia para aprovecharla correctamente; el 60% estuvo de acuerdo y el 40% totalmente de acuerdo.

En la figura 6, ante la interrogante: El proceso interno que debemos seguir en nuestra planta para solicitar soporte técnico externo es burocrático y desincentiva su uso, el 40% respondió estar totalmente en desacuerdo, el 30% en desacuerdo y el otro 30% se mantuvo en una postura neutral.

Figura 6
Resultados obtenidos de la pregunta 5: El proceso interno que debemos seguir en nuestra planta para solicitar soporte técnico externo es burocrático y desincentiva su uso.

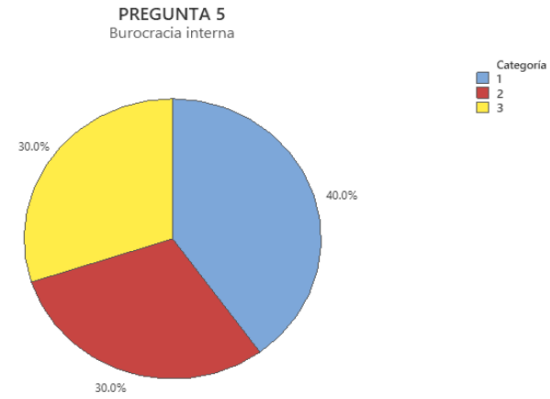
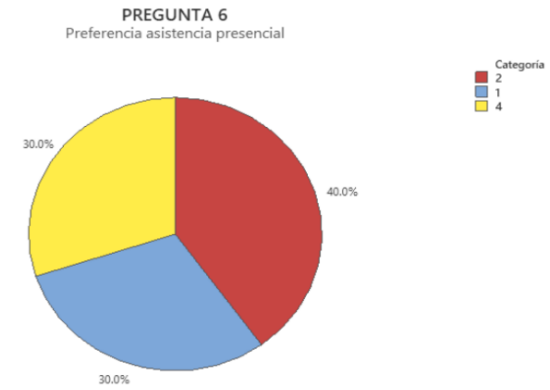


Figura 7
Resultados obtenidos de la pregunta 6: Preferimos esperar una visita presencial porque percibimos que el soporte remoto no soluciona de raíz los problemas complejos de medición.



En la figura 7, respecto a la interrogante: Preferimos esperar una visita presencial (aunque tarde más) porque percibimos que el soporte remoto no soluciona de raíz los problemas complejos de medición, el 30% respondió estar totalmente en desacuerdo, el 40% en desacuerdo y el 30% de acuerdo.

Para realizar un resumen de los hallazgos encontrados en las primeras seis preguntas, en la Tabla 2 se muestran las medias y desviaciones estándar para cada pregunta.

Tabla 2
Relación de medias y varianzas para cada ítem.

ÍTEM	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Pregunta 1	1.600	0.699
Pregunta 2	5.000	0.000
Pregunta 3	4.500	0.527
Pregunta 4	4.400	0.516
Pregunta 5	1.900	0.876
Pregunta 6	2.300	1.252

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID109

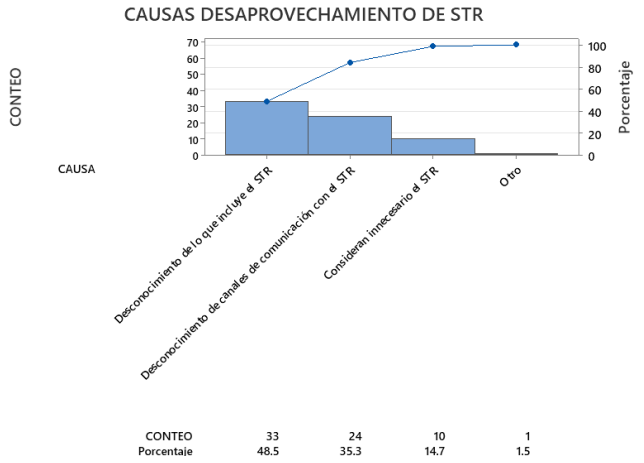
This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

- La pregunta dos, referente a la privacidad de los proyectos, demuestra que la confidencialidad de los datos de metrología en entornos de manufactura avanzada estará condicionada por el cumplimiento estricto de protocolos que salvaguarden dicha información confidencial.
- Las preguntas tres y cuatro obtuvieron puntajes altos respecto a su media y pequeños respecto a su desviación, lo que conlleva inferir que los metrólogos prefieren resolver sus dudas de manera interna, pero que están abiertos al uso del STR si se les brinda una capacitación para aprovecharlo correctamente.
- Las preguntas uno y cinco, por el contrario, obtuvieron puntuaciones bajas, lo que indica que el desaprovechamiento del STR no se debe a una falta de competencias digitales ni a la existencia de procesos burocráticos internos del cliente para solicitar la asistencia del equipo de STR.
- Por último, la pregunta 6, con una desviación estándar un tanto elevada, refleja un desacuerdo entre las opiniones de los líderes de las áreas de calidad, pues mientras que una parte de ellos prefiere el soporte técnico presencial, la otra parte acepta la solución remota como válida para solucionar sus problemas de metrología. Esto sugiere que la confianza en el STR dependerá de la falla específica que cada líder tenga con el uso del software.

D. Análisis de contenido de la pregunta abierta.

Para realizar el análisis de la pregunta abierta, se llevó a cabo un diagrama de Pareto (Grau Ahumada,2024), cuyo uso es: "Identificar las principales fuentes de defectos o errores para que las organizaciones mejoren la eficiencia operativa, reduzcan costos y aumenten la satisfacción del cliente". Realizando un agrupamiento de las respuestas obtenidas, se tiene como resultado la información que se muestra en la figura 8.

Figura 8
Respuestas a pregunta abierta: ¿Cuál considera que es el principal obstáculo para que su equipo no utilice con mayor frecuencia el soporte técnico a distancia?



Como se puede observar a través del diagrama de Pareto, el 83.8% de la problemática se centra en los dos primeros factores: el desconocimiento de las características que incluye el Servicio Técnico Remoto y el desconocimiento de los canales de comunicación con el equipo de soporte; es decir, casi la mitad de los usuarios no utiliza el STR simplemente porque no sabe que alcance tiene, los usuarios tal vez asumen erroneamente que el soporte solo sirve para fallas críticas del sistema, sin embargo incluye mucho más allá de eso, como una duda de calibración, instalación del software, configuración de la interfaz, etc.

El 35.3% revela una falla en la experiencia del usuario porque el cliente puede necesitar el soporte, pero desconoce el proceso para llegar a los ingenieros de aplicación, que son quienes se encargan de llevar a cabo el STR. Esto último puede deberse en gran medida a la no promoción de la asistencia remota por parte de los distribuidores.

También se nota que menos del 15% de los líderes de las áreas de calidad consideran innecesario el servicio, es decir, que el desaprovechamiento del STR no se debe a una falta de interés por parte de los clientes, sino a un déficit de comunicación y difusión.

3.2 Resultados de la Fase 2: Establecimiento de la correlación entre la efectividad del soporte y la fidelización del cliente.

E. Validación de correlación.

En la figura 9 se muestra el análisis de correlación con datos de sesenta empresas que cuentan con renovación anual de licencias a través del tiempo, con la finalidad de saber si existe una relación causal y determinar en qué medida el uso de STR actúa como predictor en la fidelización de los usuarios, utilizando un nivel de significancia estándar del 5%.

Figura 9
Análisis de regresión: N.° de casos atendidos vs Frecuencia de renovación anual.

Ecuación de regresión

Frecuencia renovación anual = -26.04 + 0.2553 N° de casos atendidos

Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-26.04	1.50	-17.37	0.000	
N° de casos atendidos	0.2553	0.0120	21.25	0.000	1.00

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
1.27640	88.62%	88.42%	87.71%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	735.69	735.689	451.56	0.000
N° de casos atendidos	1	735.69	735.689	451.56	0.000
Error	58	94.49	1.629		
Falta de ajuste	25	78.24	3.130	6.36	0.000
Error puro	33	16.25	0.492		
Total	59	830.18			

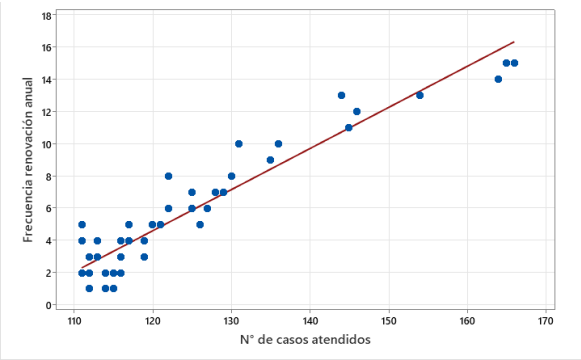
Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID109

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Se observa en primer lugar la ecuación de regresión, la cual tiene un valor positivo de la pendiente de 0.2553, lo que indica que por cada aproximadamente cuatro casos recibidos, atendidos y resueltos por el equipo de STR, la tasa de permanencia y renovación anual de licencias aumenta una unidad.

De acuerdo con el valor de R-cuadrado, se puede concluir que el 88.62% de las decisiones de renovación y fidelización a largo plazo por parte de las empresas de manufactura avanzada está determinado directamente por la efectividad del soporte técnico a distancia recibido.

Figura 10
Gráfica de dispersión: N.º de casos atendidos vs frecuencia de renovación anual.



En la figura 10, el gráfico de dispersión confirma visualmente y en primer lugar la existencia de una relación lineal positiva entre las variables. A medida que se incrementa el número de casos atendidos (eje X), se observa un incremento en la frecuencia de renovación anual (eje Y).

El análisis del dominio de la variable X en el gráfico de línea ajustada revela que las cuentas industriales operan con un piso operativo mínimo de 110 asistencias técnicas anuales. Este hecho respalda la hipótesis inicial sobre la naturaleza del software especializado: en la manufactura avanzada no existen usuarios independientes. La ausencia de clientes con bajo volumen de soporte demuestra que la adopción efectiva de la tecnología de medición está indisolublemente ligada al acompañamiento postventa constante. Por consiguiente, la interacción remota frecuente no es síntoma de falla en el producto, sino el indicador primario de la intensidad de uso y de la dependencia operativa del cliente hacia la plataforma.

El análisis gráfico también permite explicar, como segundo punto, la significancia detectada en la prueba de falta de ajuste. En el segmento inferior de la muestra (entre 110 y 120 casos atendidos), los datos exhiben una mayor varianza vertical, concentrando a clientes con tasas de renovación volátiles. En contraste, al superar la barrera de las 140 interacciones, las observaciones se estabilizan y se adhieren estrictamente a la línea de tendencia. Esto sugiere que el soporte técnico actúa como un estabilizador de la lealtad comercial: a mayor interacción y resolución remota, la variabilidad del comportamiento de compra del cliente disminuye drásticamente.

3.3 Resultados generales del estudio.

El análisis de esta investigación muestra una dinámica de dos dimensiones en la gestión de servicios post venta para software de metrología en entornos de manufactura avanzada.

En la primera fase, cuyo objetivo fue identificar las causas y factores que recaen en el desaprovechamiento del soporte técnico a distancia, el análisis descriptivo, demostró que la integridad y el resguardo de los planos y algoritmos de medición son considerados de alta confidencialidad, y que el desaprovechamiento no se basa en una resistencia cultural o falta de competencia del factor humano, sino se debe a un mecanismo de defensa corporativo por la seguridad de sus datos. Complementando el diagnóstico de la fase 1, el diagrama de Pareto, muestra que el 83.8% del desaprovechamiento se debe a dos causas raíz: el desconocimiento del alcance del STR y la falta de claridad en los canales de comunicación con el equipo.

En la segunda fase, el modelo de regresión lineal simple demostró la correlación entre las dos variables de estudio, demostrando que casi el 89% de la variabilidad en las decisiones de renovación anual de licencias, depende de la efectividad y frecuencia de los casos atendidos. En esta última fase, gráficamente, observando la dispersión de los datos, se observa que el número mínimo de casos resueltos oscila entre los 110 y al llegar aproximadamente a los 140 o más, se logra una estabilización y por ende una relación de fidelización a largo plazo, por ende, los hallazgos coinciden con lo planteado por Parasuraman et al. (2005), quienes sostienen que la eficiencia y la disponibilidad en los canales de atención remota son dimensiones determinantes para la evaluación de la calidad del servicio e inciden directamente en las intenciones de permanencia del usuario.

3.4 Limitaciones de la investigación.

A pesar de los hallazgos significativos, la presente investigación presenta ciertas limitaciones metodológicas y contextuales que deben ser consideradas al interpretar los resultados. En primer lugar, la muestra para el modelo de regresión lineal y el análisis exploratorio se concentró exclusivamente en empresas pertenecientes a los sectores de manufactura avanzada y aeroespacial. Por lo tanto, la generalización de los coeficientes obtenidos (como la tasa de conversión de aproximadamente 4 casos por unidad de renovación) hacia otras industrias con menor exigencia de precisión métrica debe realizarse con cautela.

En segundo lugar, el modelo econométrico planteado evaluó la retención a partir de un enfoque univariado centrado en la frecuencia de atención técnica. Si bien el R2 (88.62%) demuestra una capacidad explicativa dominante del soporte remoto, no se incorporaron otros tipos de variables, tales como la fluctuación de los presupuestos corporativos anuales o los costos de cambio de licencias.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID109

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio cumple con el objetivo de evaluar el impacto del servicio al cliente en la fidelización de los mismos de la empresa desarrolladora de software para equipos de medición.

Se concluye en primera instancia que el desaprovechamiento observado del soporte técnico remoto no radica en las variables operativas del usuario sino en una desconexión entre la rigidez de los protocolos de seguridad y la transparencia en la comunicación del proveedor.
Las organizaciones de manufactura avanzada perciben sus datos de metrología como activos críticos infranqueables; por lo tanto, la empresa desarrolladora debe garantizar canales de comunicación transparentes y seguros.

En segunda instancia, se rechaza la visión tradicional del concepto de soporte técnico remoto como un mero centro de resolución de quejas, pues los resultados estadísticos demuestran la importancia del STR en la retención y fidelización de clientes.

En un mercado tecnológico y tan especializado, el servicio posventa se convierte en un factor estratégico y en uno de los principales factores diferenciadores competitivos, así lo refiere Baines (2009): “En la industria de manufactura avanzada, la transición de la venta de productos hacia la provisión de soluciones integradas y servicios de alto valor añadido, fenómeno conocido como servitización, ha transformado la relación con el cliente”.

Se sugiere que los ingenieros de aplicación de la empresa desarrolladora detallen las distintas formas de atención por parte del equipo de STR en los contratos con sus clientes, así como también se cercioren de que los distribuidores den a conocer y promuevan el STR que ofrece la compañía. La empresa no debe asumir que el cliente conoce el alcance de su contrato; se vuelve imperativo implementar campañas de difusión técnica periódicas orientadas a los ingenieros de calidad de planta.

Por otro lado, a partir de las evidencias obtenidas, se proponen diversas líneas de investigación para profundizar en la servitización de software industrial. Se sugiere, en primer término, desarrollar modelos de regresión múltiple que integren variables mediadoras como el Tiempo Promedio de Resolución y el Nivel de Satisfacción del Usuario, analizando su interacción conjunta sobre la lealtad de la cuenta.

También, se recomienda realizar un estudio comparativo longitudinal para evaluar si la implementación de protocolos de ciberseguridad homologados reduce significativamente la tasa de subutilización detectada en el Análisis de Pareto.

Por último, resultaría de alto valor académico explorar el fenómeno de dependencia técnica en pymes manufactureras versus grandes corporativos aeroespaciales mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) de dos factores, determinando si el tamaño de la planta modera la efectividad del soporte remoto.

V. AGRADECIMIENTOS

Se hace extensivo el agradecimiento al Tecnológico Nacional de México, al Instituto Tecnológico Superior de San Pedro de las Colonias y al Instituto Tecnológico de la Laguna, quienes, como instituciones educativas, contribuyen a la generación de nuevo conocimiento mediante el apoyo a sus docentes investigadores.
Un especial reconocimiento a la empresa que depositó la confianza en nosotros para realizar el presente proyecto.

VI. REFERENCIAS

Alcaide Marzal, J. C. (2015). *Fidelización de clientes.* ESIC Editorial.

Baines, T. S., Lightfoot, H. W., Benedettini, O., & Kay, J. M. (2009). The servitization of manufacturing: A review of its literature and practice. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20(5), 547–567. https://doi.org/10.1108/17410380910960009

Flores-Bautista, P.A., Sánchez-Ayala, J.A., Jimenez-DeLucio, J., Rojo-Cisneros, S.J. (2023) Comprendiendo la fidelización de clientes: elementos clave, estadísticas y clasificaciones. XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan. Vol. 11No. 22 p.p 18-24https://doi.org/10.29057/xikua.v11i22.10650

Grau-Ahumada y Otros, «Diagrama de Pareto. Perspectiva de la Asignatura de Control de la Calidad» Boletín de Innovación, Logística y Operaciones, vol. 6. No. 1. pp. 51-56, 2024. Online. https://revistascientificas.cuc.edu.co/bilo/article/view/4920

Kamp, B. (2016). La servitización como estrategia para la evolución competitiva de la industria. Boletín de Estudios Económicos, 71(218), 75-84. https://www.researchgate.net/publication/340716509_La_servitizacion_como_estrategia_para_la_evolucion_competitiva_de_la_industria

López Vargas, Y; Vázquez Chávez, A. (2016). La Gestión de Servicios de soporte técnico en el ciclo de vida del desarrollo de software. Revista Cubana de Ciencias Informáticas, vol. 10, 2016, pp. 46-60. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=378346333004

Martínez Espinosa, V. (2025). Regresión lineal simple. Vida Científica Boletín Científico De La Escuela Preparatoria No. 4, 13(26), 36–37. https://doi.org/10.29057/prepa4.v13i26.14751

Parasuraman, A., Zeithaml, V. A., & Malhotra, A. (2005). E-S-QUAL: A multiple-item scale for assessing electronic service quality. Journal of Service Research, 7(3), 213–233. https://doi.org/10.1177/1094670504271156

Quero Virla, M., (2010). Confiabilidad y coeficiente Alpha de Cronbach. Telos, 12(2), 248-252.

Toala-Manjarrez, E., Manjarrez-Fuentes, N., & Campos-Cárdenas, J., (2025). Análisis de la calidad del servicio y su impacto en la satisfacción del cliente en una compañía nacional. 593 Digital Publisher CEIT, 10(3), 1232-1244. https://doi.org/10.33386/593dp.2025.3.3261

Vargas-Vargas, G. (2006). El servicio al cliente: ¡Más que un querer, un deber! [Archivo PDF]

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2881099.pdf&ved=2ahUKEwjRqOGvpcCUAxW5J0QIHRB4MbwQFnoECBYQAQ&usg=AOvVaw3oAtQ7kjsJZtCFfFZ0raqL

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización [Conceptualization]	Yisvi Saray Ochoa Corona
2	Curación de datos [Data curation]	Ulises Martínez Rodríguez
3	Análisis formal [Formal analysis]	Yisvi Saray Ochoa Corona
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Oscar Fabián Ramos Ochoa
5	Investigación [Investigation]	Yisvi Saray Ochoa Corona
6	Methodología [Methodology]	Oscar Fabián Ramos Ochoa
7	Administración del proyecto [Project administration]	Idalia Ruiz Arroyo
8	Recursos [Resources]	Oscar Fabián Ramos Ochoa
9	Software [Software]	Ulises Martínez Rodríguez
10	Supervision [Supervision]	Idalia Ruiz Aroyo
11	Validación [Validation]	Idalia Ruiz Arroyo
12	Visualización [Visualization]	Ulises Martínez Rodríguez
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Yisvi Saray Ochoa Corona
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Yisvi Saray Ochoa Corona

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID109

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Identificación de Dificultades de Aprendizaje en Álgebra Lineal mediante Modelos Predictivos de Machine Learning

Identifying Learning Difficulties in Linear Algebra Using Machine Learning Predictive Models

Campino-Aguirre, T.I.[1]; Moreno-Núñez, E.[2]; Rodríguez-Lozano, K.V.[3]

Datos de Adscripción:

[1] ✉ Campino Aguirre, Tonatzin Isabel
Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
tonatzin.ca@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1884-7121

[2] Moreno Núñez, Elda
Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
elda.mn@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5912-082X

[3] Rodríguez Lozano, Karla Verónica
Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: https://ror.org/00davry38
ROR ID: https://ror.org/04bjtbt12
karla.rl@itslerdo.edu.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2832-4165

Resumen **- Las dificultades que enfrentan los estudiantes universitarios en asignaturas como Álgebra Lineal suelen pasar desapercibidas hasta que los rezagos ya son difíciles de revertir. Este trabajo propone una alternativa basada en modelos de Aprendizaje Automático para detectar de forma temprana esas dificultades, tomando como población de estudio a cien estudiantes de segundo semestre de educación superior que cursaban simultáneamente varias asignaturas de ciencias exactas. Con el fin de aprovechar la información escrita generada durante el curso, se recopilaron respuestas y comentarios académicos de los participantes, los cuales fueron transformados en representaciones numéricas mediante la técnica de Frecuencia de Término-Frecuencia Inversa de Documento. Sobre esa base, se entrenaron y compararon dos clasificadores supervisados: Máquinas de Vectores de Soporte y Naive Bayes, orientados a distinguir entre estudiantes con y sin dificultades de aprendizaje. Ambos algoritmos alcanzaron niveles de desempeño satisfactorios, aunque las Máquinas de Vectores de Soporte mostraron ventajas claras en precisión y en la identificación de los casos más críticos. Estos hallazgos permiten concluir que incorporar herramientas de este tipo en los entornos educativos universitarios no solo es viable, sino que puede transformar la manera en que los docentes detectan y atienden las necesidades de sus estudiantes. Actuar con antelación, antes de que las dificultades se profundicen, representa un avance concreto hacia una educación más atenta, personalizada y sustentada en evidencia.**

Palabras Clave **- Álgebra lineal, Aprendizaje automático, Clasificación supervisada, Dificultades de aprendizaje, Educación superior, Modelos predictivos.**

Abstract **- Learning difficulties in courses like Linear Algebra often go unnoticed until students fall so far behind that catching up becomes a real challenge. This study proposes an approach based on Machine Learning models to detect these difficulties early, drawing on a sample of one hundred second-semester higher education students who were simultaneously enrolled in several exact sciences courses. To make use of the written information generated throughout the course, academic responses and comments from participants were collected and transformed into numerical representations using the Term Frequency-Inverse Document Frequency technique. From that foundation, two supervised classifiers were trained and compared: Support Vector Machines and Naive Bayes, both aimed at distinguishing between students with and without learning difficulties. Both algorithms achieved satisfactory performance levels, though Support Vector Machines showed clear advantages in accuracy and in identifying the most critical cases. These findings suggest that incorporating tools of this kind into university settings is not only feasible, but could genuinely change how educators detect and respond to their students' needs. Taking action early, before difficulties become deeply rooted, is a meaningful step toward an education that is more attentive, personalized, and grounded in evidence.**

Keywords **- Higher education, Learning difficulties, Linear Algebra, Machine Learning, Predictive models, Supervised classification.**

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más persistentes en la educación superior es, paradójicamente, uno de los más difíciles de ver a tiempo: detectar cuándo un estudiante está comenzando a perder el paso antes de que esa dificultad se convierta en reprobación o, peor aún, en abandono escolar. En asignaturas que exigen un alto nivel de abstracción matemática, como Álgebra Lineal, este problema se vuelve especialmente agudo. La velocidad con la que avanzan los programas académicos y la complejidad conceptual inherente a la materia dejan poco margen para que las dificultades se detecten de forma natural en el transcurso del semestre (Kolman & Hill, 2006). No se trata de una asignatura periférica: el Álgebra Lineal es un pilar formativo en carreras de ingeniería, ciencias computacionales y disciplinas afines, y su dominio constituye un prerrequisito implícito para avanzar con solidez en materias como Cálculo Vectorial, Probabilidad y Estadística, Inteligencia Artificial y Procesamiento de Señales, entre otras. La magnitud del problema queda

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID110

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

reflejada en las cifras: investigaciones previas han documentado tasas de reprobación que superan el 30% en esta asignatura a nivel universitario, y la causa más frecuentemente señalada son las brechas conceptuales que no fueron identificadas ni atendidas a tiempo (Dorier & Sierpinska, 2001).

Frente a este escenario, la minería de datos educativos ha ido ganando terreno como un campo interdisciplinar que articula técnicas de aprendizaje automático, estadística y gestión de bases de datos para analizar, de manera sistemática, el comportamiento académico de los estudiantes (Baker & Inventado, 2014). Lo que hace valioso este enfoque es su capacidad para revelar patrones que a simple vista permanecerían ocultos en la masa de datos que genera cualquier proceso de enseñanza-aprendizaje, abriendo así la posibilidad de diseñar intervenciones pedagógicas tempranas, oportunas y sustentadas en evidencia concreta (Romero & Ventura, 2010). Como se muestra en la Figura 1, el proceso metodológico de este trabajo está organizado en siete etapas que recorren el camino desde la recolección inicial de datos textuales hasta la generación de estrategias pedagógicas adaptadas a las necesidades de cada estudiante.
Entre las herramientas de procesamiento del lenguaje natural disponibles para analizar texto académico, una de las más consolidadas es la técnica conocida como Frecuencia de Término–Frecuencia Inversa de Documento, desarrollada originalmente por Salton y Buckley (1988). Su funcionamiento se basa en convertir documentos de texto en vectores numéricos, asignando a cada término un peso que refleja tanto su presencia en el documento analizado como su distribución en el conjunto total de textos. En términos simples, pondera más aquellas palabras que son frecuentes en un documento, pero poco comunes en los demás, lo que permite capturar con mayor precisión los rasgos distintivos de cada texto. En contextos educativos, esta técnica ha demostrado ser una herramienta eficaz para inferir el nivel de comprensión conceptual de los estudiantes a partir de sus respuestas escritas (Manning et al., 2008).

En cuanto a los algoritmos de clasificación, dos de los más estudiados en problemas de categorización textual son las Máquinas de Vectores de Soporte y el clasificador Naive Bayes. Las Máquinas de Vectores de Soporte, introducidas por Cortes & Vapnik (1995), operan buscando el hiperplano que mejor separa las distintas clases en el espacio de características, y se distinguen por su robustez frente a datos de alta dimensionalidad, una condición habitual cuando se trabaja con representaciones textuales. El clasificador Naive Bayes, por su parte, aplica el teorema de Bayes asumiendo independencia condicional entre las características del texto, lo que lo convierte en una alternativa computacionalmente eficiente y sorprendentemente competitiva en muchos escenarios prácticos (Mitchell, 1997). Kotsiantis (2012) demostró que ambos tipos de modelos son capaces de predecir el rendimiento académico con niveles de precisión aceptables cuando se cuenta con datos cualitativos sobre el desempeño de los estudiantes.

Este trabajo parte precisamente de esa posibilidad y la lleva al terreno del aula real, aplicando modelos predictivos de aprendizaje automático sobre los textos producidos por estudiantes universitarios de segundo semestre en la asignatura de Álgebra Lineal. La pregunta central que guía el estudio es si es posible clasificar a los estudiantes en dos grupos —con y sin dificultades de aprendizaje— tomando como única fuente de información sus respuestas escritas, procesadas mediante vectorización textual y evaluadas con dos clasificadores supervisados.

Vale la pena detenerse un momento en la elección del texto escrito como fuente de datos, porque no es una decisión arbitraria. Podría haberse optado por calificaciones parciales, registros de asistencia u otros indicadores más convencionales. Sin embargo, cada una de esas señales llega tarde. Una calificación reprobatoria le informa al docente que algo salió mal, pero el daño ya está hecho; la inasistencia es un síntoma, no una causa, y muchas veces aparece cuando el estudiante ya perdió la motivación para seguir intentándolo. El texto que un estudiante produce al intentar explicar un concepto matemático con sus propias palabras revela algo cualitativamente diferente: cómo está procesando la información en ese preciso momento. Quien comprende escribe con precisión y coherencia; quien no comprende lo deja ver en la vaguedad, en las contradicciones o en el silencio de su escritura. Esa diferencia no necesita un examen formal para manifestarse; está presente en las respuestas que los estudiantes producen en el día a día del aula.

Esta intuición está respaldada por evidencia empírica. Investigaciones recientes en procesamiento de lenguaje natural aplicado a la educación han mostrado que incluso respuestas muy breves, de apenas dos o tres oraciones, contienen información léxica suficiente para distinguir distintos niveles de dominio conceptual (Hand et al., 2001; Manning et al., 2008). Esto tiene implicaciones prácticas muy concretas para instituciones con grupos numerosos, donde resulta materialmente imposible que el docente haga un seguimiento individualizado de cada estudiante a lo largo del semestre. En ese contexto, un clasificador automático entrenado con los datos del propio grupo no pretende reemplazar al docente ni sustituir su criterio profesional: simplemente le proporciona información que, sin esta herramienta, nunca llegaría a tiempo para marcar una diferencia.

Los resultados de este estudio buscan contribuir al diseño de estrategias pedagógicas personalizadas orientadas a la atención temprana del rezago académico. El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección II detalla la metodología técnica empleada; la Sección III presenta los resultados obtenidos y su discusión; y las Secciones IV, V y VI recogen las conclusiones del trabajo, los agradecimientos correspondientes y las referencias bibliográficas.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

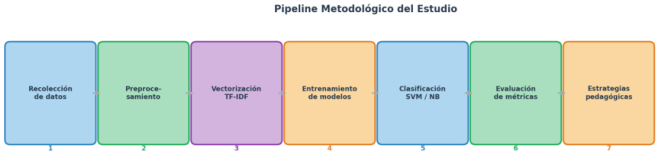
Esta sección describe el proceso metodológico seguido para la recolección, el preprocesamiento y el análisis de los datos textuales, así como el diseño, entrenamiento y evaluación de los modelos de clasificación supervisada empleados.

La Figura 1 resume el pipeline completo desde la recolección de datos hasta las estrategias pedagógicas personalizadas.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID110

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 1
Pipeline metodológico del estudio.



2.1 Contexto y población de estudio

El estudio se llevó a cabo con una muestra de 100 estudiantes de segundo semestre de una institución de educación superior tecnológica inscritos en la asignatura de Álgebra Lineal durante el ciclo escolar 2025. La Tabla 1 describe la distribución de los estudiantes por categoría de aprendizaje, género y promedio académico al inicio del semestre.

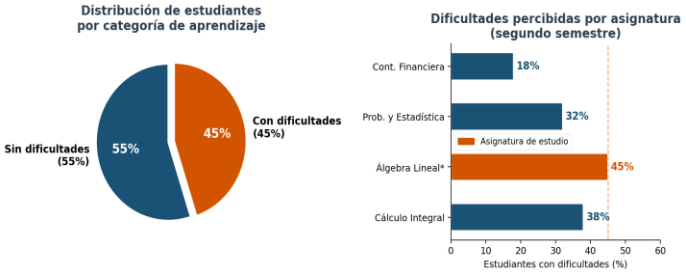
Tabla 1
Caracterización de la muestra de estudio (n = 100 estudiantes).

Categoría	*n*	*Promedio inicial (0-100)*	*Distribución por género (H/M)*
Sin dificultades de aprendizaje	55	79.4 ± 6.1	29 / 26
Con dificultades de aprendizaje	45	64.2 ± 8.3	25 / 20
Casos críticos (subgrupo)	12	55.1 ± 5.9	7 / 5
Total	100	72.3 ± 9.8	54 / 46
Tasa de reprobación semestral previa	—	28.0%	—

La elección de Álgebra Lineal como objeto de estudio responde a su elevada tasa de dificultad percibida entre los estudiantes de segundo semestre, quienes la cursaban junto con Cálculo Integral, Probabilidad y Estadística y Contabilidad Financiera. En el semestre previo, los participantes habían cursado Cálculo Diferencial y Matemáticas Discretas.

La Figura 2 ilustra la distribución de los estudiantes por categoría de segundo semestre y compara el porcentaje de dificultades reportadas en las cuatro asignaturas del semestre que se está cursando, evidenciando que Álgebra Lineal concentra el mayor índice (45%).

Figura 1
Izquierda: distribución de 100 estudiantes por categoría de aprendizaje. Derecha: porcentaje de estudiantes con dificultades por asignatura



2.2 Recolección de datos

Los datos textuales se recopilaron a lo largo del semestre mediante tres estrategias complementarias: (a) respuestas escritas a preguntas abiertas sobre conceptos de Álgebra Lineal: vectores, matrices, transformaciones lineales, espacios vectoriales; (b) comentarios académicos registrados durante sesiones de resolución de problemas; y (c) reflexiones escritas al final de cada unidad temática.

En total se recopilaron 1,200 registros textuales, con un promedio de 12 registros por estudiante. De ellos, 660 correspondieron a la categoría sin dificultades de aprendizaje y 540 a la categoría con dificultades de aprendizaje.

La Tabla 2 presenta ejemplos representativos de respuestas en cada categoría.

Tabla 2
Ejemplos de respuestas textuales por categoría de aprendizaje.

Sin dificultades de aprendizaje	*Con dificultades de aprendizaje*
"La base del espacio vectorial debe ser linealmente independiente y generar todo el espacio."	"No entiendo para qué sirve la matriz, parece que es como una tabla de números."
"El espacio nulo del operador contiene todos los vectores que se mapean al vector cero."	"Creo que el determinante se calcula multiplicando los números de alguna manera especial."
"Apliqué eliminación gaussiana para encontrar la forma escalonada y determinar el rango."	"Me confundo entre el espacio imagen y el espacio nulo, no sé cuál es cuál."
"Prefiero el método de la regla de Cramer para encontrar la solución de un Sistema de Ecuaciónes Lineales"	"El resultado me dio un número grande y no sé si eso está bien o mal."

Cada registro fue etiquetado manualmente por el docente como perteneciente a una de dos categorías. El criterio de etiquetado consideró la precisión conceptual del texto, el uso de vocabulario técnico adecuado y la coherencia lógica de las explicaciones. Para garantizar la confiabilidad del etiquetado, un segundo evaluador revisó de manera independiente el 20% de los registros, obteniendo un coeficiente de acuerdo Kappa de Cohen de 0.83, que indica concordancia sustancial entre evaluadores (Landis & Koch, 1977).

Un aspecto que se cuidó especialmente durante la recolección fue la naturalidad de los registros. Las respuestas no fueron solicitadas en un formato de examen ni como actividad evaluable con calificación directa; se presentaron como reflexiones de seguimiento al final de cada sesión, lo que redujo la tendencia de los estudiantes a escribir lo que creían que el docente quería leer. Se buscaba capturar el lenguaje espontáneo de comprensión, no una performance académica. Esa distinción es metodológicamente importante: un texto que el estudiante produce bajo presión evaluativa tiende a aproximar el vocabulario técnico que ha memorizado, no el que realmente maneja. El lenguaje informal de reflexión, en cambio, expone con mayor fidelidad el grado real de apropiación conceptual.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID110

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

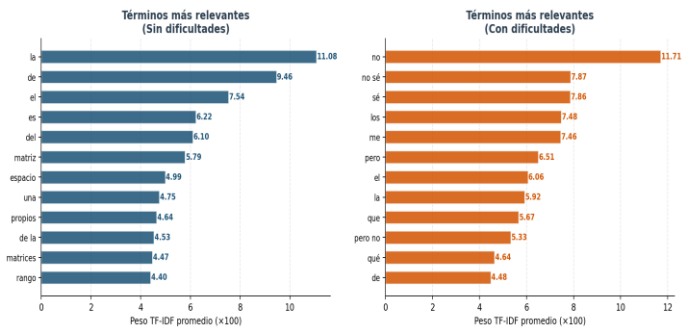
También se registró el orden cronológico de los textos: los primeros registros de cada estudiante corresponden a las unidades iniciales del semestre (vectores y matrices), mientras que los últimos cubren temas más avanzados como transformaciones lineales y valores propios. Este orden no se explotó en el modelo actual —que trata todos los registros como independientes—, pero representa información valiosa para versiones futuras que consideren la evolución temporal del vocabulario del estudiante como variable adicional.

2.3 Preprocesamiento y vectorización TF-IDF

Antes de aplicar los modelos de clasificación, el corpus textual fue sometido a un proceso de preprocesamiento que incluyó: (a) normalización: conversión a minúsculas y eliminación de caracteres especiales; (b) eliminación de palabras vacías; (c) tokenización: segmentación en unidades léxicas individuales; y (d) lematización: reducción de palabras a su forma base. Posteriormente, se aplicó la técnica de Frecuencia de Término-Frecuencia Inversa de Documento con un vocabulario de 300 términos y bigramas (n-gramas de hasta dos palabras), generando un espacio de características de alta dimensionalidad. La Figura 3 muestra los doce términos con mayor peso en cada clase.

Figura 2

Términos con mayor peso promedio de Frecuencia de Término-Frecuencia Inversa de Documento por clase: sin dificultades (izquierda) y con dificultades (derecha).



2.4 Modelos de clasificación supervisada

Con los vectores numéricos como entrada, se entrenaron y evaluaron dos clasificadores. Las Máquinas de Vectores de Soporte con kernel lineal buscan encontrar el hiperplano de máximo margen que separa las dos clases en el espacio de características. El clasificador Naive Bayes Multinomial aplica el teorema de Bayes bajo la suposición de independencia condicional entre términos. Ambos modelos fueron implementados en Python mediante la biblioteca Scikit-learn (Pedregosa et al., 2011). El corpus se dividió a nivel de registro textual: 960 registros (80%) se destinaron al entrenamiento y 240 (20%) a la prueba. Las métricas finales se reportaron sobre 20 estudiantes del conjunto de prueba. La documentación disponible no especifica la regla utilizada para integrar, por estudiante, las predicciones derivadas de sus registros; por ello, no se atribuye un procedimiento de agregación particular. Además, se aplicó validación cruzada estratificada de cinco pliegues para valorar la estabilidad de los resultados. A continuación, se presenta el fragmento de código principal de la implementación:

```
1.  from sklearn.feature_extraction.text import TfidfVectorizer
2.  from sklearn.svm import LinearSVC
3.  from sklearn.naive_bayes import MultinomialNB
4.  from sklearn.model_selection import cross_val_score,
StratifiedKFold
5.  from sklearn.metrics import accuracy_score,
precision_score, recall_score, f1_score
6.
7.  vectorizer = TfidfVectorizer(max_features=300,
ngram_range=(1,2), sublinear_tf=True)
8.  X = vectorizer.fit_transform(corpus_preprocesado)
9.  y = etiquetas  # 0 = sin dificultad, 1 = con dificultad
10.
11. svm_model = LinearSVC(C=0.5, max_iter=5000,
random_state=42)
12. nb_model  = MultinomialNB(alpha=1.5)
13.
14. cv = StratifiedKFold(n_splits=5, shuffle=True,
random_state=42)
15. svm_scores = cross_val_score(svm_model, X, y, cv=cv)
16. nb_scores  = cross_val_score(nb_model,  X, y, cv=cv)
```

2.5 Métricas de evaluación

El desempeño de cada clasificador fue evaluado mediante exactitud, precisión, sensibilidad y puntuación F1.

La exactitud expresa la proporción de predicciones correctas sobre el total de instancias. La precisión cuantifica, de entre las predicciones positivas, qué proporción corresponde a verdaderos positivos; por su parte, la sensibilidad mide la capacidad del modelo para identificar todos los casos positivos reales.

La puntuación F1 representa la media armónica entre precisión y sensibilidad. Adicionalmente, se calcularon las curvas de característica Operativa del Receptor y el área bajo dicha curva como indicador global de discriminación entre clases.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 3 presenta los resultados comparativos de ambos modelos sobre el conjunto de prueba (20 instancias), evaluados con las cuatro métricas descritas en la sección anterior.

Tabla 3

Comparación de métricas de desempeño: Máquinas de Vectores de Soporte vs. Naive Bayes (conjunto de prueba, n = 20).

Métrica	*SVM*	*Naive Bayes*	*Diferencia*
Exactitud	95.0%	90.0%	+5.0 pp
Precisión	90.0%	88.9%	+1.1 pp
Sensibilidad	100.0%	88.9%	+11.1 pp
Puntuación F1	94.7%	88.9%	+5.8 pp
Área bajo la curva ROC	0.960	0.960	+0.000

La Figura 4 ilustra estos resultados de forma visual mediante un gráfico de barras agrupadas.

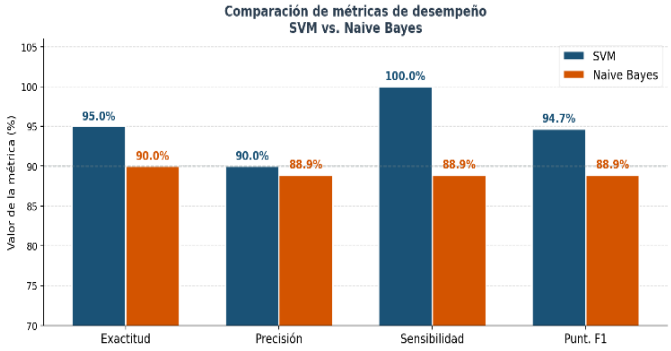
Los resultados revelan que ambos clasificadores alcanzaron niveles de desempeño satisfactorios. Las Máquinas de Vectores de Soporte obtuvieron valores superiores en exactitud, precisión, sensibilidad y puntuación F1, mientras que ambos modelos alcanzaron la misma área bajo la curva ROC (0.960).

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID110

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 4

Comparación de métricas de desempeño por modelo: Máquinas de Vectores de Soporte (azul) vs. Naive Bayes (naranja).

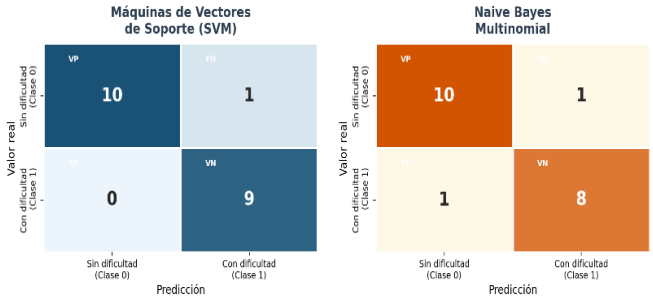


La diferencia más notable se observa en la sensibilidad: 100.0% frente a 88.9%, lo que significa que las Máquinas de Vectores de Soporte identificaron la totalidad de los estudiantes con dificultades en el conjunto de prueba, sin ningún falso negativo. Esto es pedagógicamente crucial, ya que un estudiante con dificultades no detectadas representa un caso de rezago que avanzará sin intervención.

La Figura 5 muestra las matrices de confusión de ambos modelos: Máquinas de Vectores de Soporte (izquierda) y Naive Bayes (derecha). VP = Verdadero Positivo, FP = Falso Positivo, FN = Falso Negativo, VN = Verdadero Negativo.

Figura 5

Matrices de confusión de ambos modelos

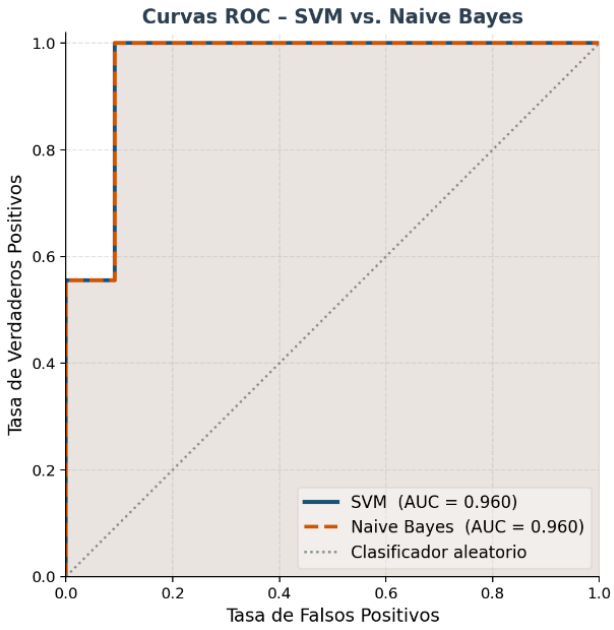


Para las Máquinas de Vectores de Soporte se observa una sola clasificación errónea: un estudiante sin dificultades fue clasificado como con dificultades (falso positivo), mientras que todos los casos reales de dificultades fueron detectados correctamente. El clasificador Naive Bayes cometió dos errores: un falso positivo y un falso negativo. Este último tipo de error es el más costoso en el contexto educativo, pues implica dejar sin atención a un estudiante en riesgo.

La Figura 6 presenta las curvas de Característica Operativa del Receptor de ambos modelos. Tanto las Máquinas de Vectores de Soporte como Naive Bayes alcanzaron un área bajo la curva de 0.960, por lo que mostraron la misma capacidad discriminativa global en esta métrica, aunque difirieron en sensibilidad y precisión. Ambos modelos superan ampliamente el umbral de un clasificador aleatorio (área = 0.500).

Figura 6

Curvas *de característica operativa del receptor: máquinas de vectores de soporte vs. Naive bayes. El área bajo la curva mide la capacidad discriminativa global.*



La Tabla 4 detalla los resultados de la validación cruzada de cinco pliegues, mientras que la Figura 7 los visualiza mediante diagramas de caja; cada punto representa la exactitud en un pliegue; la caja muestra la distribución de los cinco valores.

Tabla 4

Resultados de validación cruzada estratificada (5 pliegues) por modelo.

Modelo	*Pliegues (exactitud %)*	*Media (%)*	*Desv. estándar (%)*
SVM	80.0 / 95.0 / 90.0 / 90.0 / 90.0	89.0	4.9
Naive Bayes	80.0 / 85.0 / 90.0 / 90.0 / 90.0	87.0	4.0
Diferencia SVM − NB	—	+2.0	0.9

Las Máquinas de Vectores de Soporte obtuvieron una exactitud media del 89.0% ± 4.9%, mientras que Naive Bayes alcanzó 87.0% ± 4.0%. La menor desviación estándar de Naive Bayes indica mayor estabilidad entre pliegues, aunque la media de las Máquinas de Vectores de Soporte es consistentemente superior.

El análisis de los términos con mayor peso en la vectorización, visualizado en la Figura 3, reveló patrones semánticos diferenciados entre ambas clases.

Los textos clasificados como sin dificultades concentraron términos técnicos precisos como “transformación lineal”, “espacio nulo”, “independencia lineal” e “imagen del operador”. En contraste, los textos con dificultades mostraron mayor frecuencia de expresiones vagas como “número grande”, “no entiendo” y “no

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID110

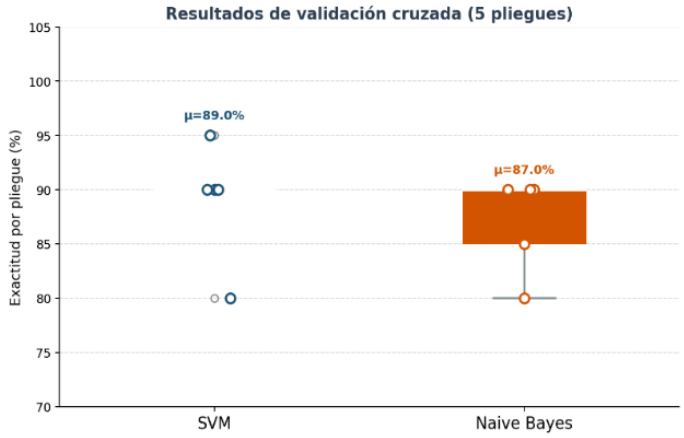
This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

sé exactamente". Esto confirma que el lenguaje escrito del estudiante constituye un indicador confiable de su nivel de comprensión conceptual, coherente con lo reportado por Manning et al. (2008).

Estos resultados son consistentes con la literatura sobre clasificación supervisada en entornos educativos. Romero y Ventura (2010) reportaron que las Máquinas de Vectores de Soporte son especialmente robustas en espacios de alta dimensionalidad generados por vectorización textual. Kotsiantis (2012) señaló que los modelos basados en texto libre ofrecen una perspectiva complementaria a la de las métricas cuantitativas tradicionales.

Figura 7

Resultados *de validación cruzada de cinco pliegues.*



La Tabla 5 compara el rendimiento de los modelos del presente estudio con los reportados en investigaciones previas de referencia.

Tabla 5

Comparación del desempeño de los modelos con estudios previos en minería de datos educativos.

Estudio	*Técnica empleada*	*Exactitud reportada*	*Dominio*
Presente estudio	SVM + TF-IDF	95.0%	Álgebra Lineal
Presente estudio	Naive Bayes + TF-IDF	90.0%	Álgebra Lineal
Romero y Ventura (2010)	SVM	87.5%	Cursos en línea (general)
Kotsiantis (2012)	Árbol de decisión	83.2%	Matemáticas generales

Un hallazgo complementario que los números de la Tabla 3 no capturan directamente es la consistencia del error que comete cada modelo. Las Máquinas de Vectores de Soporte fallaron en un único caso: un estudiante sin dificultades reales cuyo vocabulario escrito tenía características que el modelo asoció con el grupo de riesgo; posiblemente porque ese alumno expresaba incertidumbre de forma explícita sin que esta reflejara una dificultad conceptual genuina. En cambio, el modelo de Naive Bayes distribuyó sus errores en dos casos distintos. Esta diferencia no modifica los porcentajes dramáticamente, pero en cambio, sí tiene implicaciones prácticas: el tipo de error de SVM genera una falsa alarma que el docente puede resolver con una conversación breve; el error de Naive Bayes genera un caso no detectado que no recibe ninguna atención, por lo que en un sistema de soporte a la decisión docente, es preferible tener un exceso de alertas a tener casos perdidos.

Vale la pena detenerse en un dato que puede parecer paradójico: ambos modelos obtienen exactamente el mismo valor de área bajo la curva ROC (0.960), aunque difieren en sensibilidad y precisión. La razón es que esta métrica no evalúa un único punto de corte, sino que promedia el desempeño a lo largo de todos los umbrales posibles, mientras que los valores de la Tabla 3 reflejan lo que ocurre en un umbral particular.

Esto tiene implicaciones concretas para quienes diseñan estos sistemas. En un contexto real, una institución podría preferir ser más precavida y marcar como "en riesgo" a más estudiantes, aunque con menor certeza; esto elevaría la sensibilidad del modelo, pero también generaría más falsos positivos. No hay una respuesta única correcta: la curva ROC precisamente sirve para visualizar ese equilibrio y ayudar a cada institución a elegir el umbral que mejor se adapte a su realidad, sus capacidades de atención y el tipo de riesgo que está dispuesta a asumir.

Hay un hallazgo que se debe destacar por sus implicaciones prácticas: los 12 estudiantes identificados como casos críticos, aquellos con el promedio inicial más bajo (55.1 ± 5.9) y con la mayor distancia entre lo que escriben y lo que la asignatura demanda, representan precisamente el grupo en el que más importa no equivocarse. Las Máquinas de Vectores de Soporte los detectaron a todos sin excepción, mientras que Naive Bayes no logró identificar correctamente a uno de ellos. Aunque la muestra no es suficientemente grande para sacar conclusiones definitivas, el patrón es sugerente: SVM parece construir una frontera de decisión más sensible a los perfiles extremos, justo donde la intervención es más urgente.

En cuanto a si esto podría funcionar fuera del laboratorio, la respuesta es alentadora. Los modelos no requieren encuestas adicionales, pruebas especiales ni que el docente cambie su forma de enseñar. Se alimentan directamente de lo que los estudiantes ya escriben durante las actividades normales de la asignatura. Con que esas respuestas queden registradas en formato digital, algo que la mayoría de las plataformas educativas actuales ya hacen por defecto, el sistema puede operar. Eso lo convierte en una propuesta no solo técnicamente sólida, sino también realista para instituciones que no cuentan con grandes recursos tecnológicos.

Los resultados deben interpretarse como evidencia exploratoria. La muestra se limitó a 100 estudiantes de segundo semestre de una sola institución y las métricas finales se calcularon sobre 20 estudiantes del conjunto de prueba. Además, la partición 80/20 se realizó por registro textual, por lo que registros de un mismo estudiante pudieron quedar representados en ambos

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

subconjuntos. Esta dependencia potencial puede favorecer la similitud entre entrenamiento y prueba y limitar la generalización de los porcentajes observados. La validación cruzada de cinco pliegues aporta una estimación adicional de estabilidad, pero no sustituye una validación externa con estudiantes e instituciones diferentes.

IV. CONCLUSIONES

Este estudio demostró que es técnicamente posible, y pedagógicamente valioso utilizar modelos de aprendizaje automático para detectar de manera temprana las dificultades que enfrentan los estudiantes en Álgebra Lineal, partiendo de algo tan cotidiano como el lenguaje que ellos mismos producen por escrito. Las Máquinas de Vectores de Soporte lograron una exactitud del 95.0% y una sensibilidad del 100.0%, lo que significa que identificaron a la totalidad de los estudiantes con dificultades dentro del conjunto de prueba, sin dejar escapar ningún caso. Desde una perspectiva pedagógica, ese resultado no es un detalle menor: es, en realidad, el hallazgo más importante de toda la investigación.

Al comparar los dos clasificadores, quedó claro que Naive Bayes ofrece ventajas reales en términos de eficiencia computacional y estabilidad entre los distintos pliegues de validación, pero que las Máquinas de Vectores de Soporte resultan más adecuadas cuando lo que está en juego es no dejar pasar ningún caso sin detectar. Dicho esto, los dos enfoques no son excluyentes: combinarlos podría abrir una vía prometedora para manejar mejor la heterogeneidad de los perfiles estudiantiles y mejorar aún más el desempeño conjunto del sistema.

Sin embargo, el aporte más significativo de este trabajo va más allá de los porcentajes de exactitud. Lo que realmente importa es lo que estos modelos hacen posible en el aula: identificar con anticipación a quienes están perdiendo el hilo, antes de que esa dificultad se convierta en un rezago difícil de revertir. Con esa información en mano, el docente puede actuar de manera oportuna y diferenciada, ya sea a través de andamiaje cognitivo, tutorías dirigidas, estrategias de aprendizaje entre pares, u otras intervenciones adaptadas a cada caso. En ese sentido, la propuesta representa un avance concreto hacia una educación más atenta, más flexible y más fundamentada en evidencia real sobre el proceso de aprendizaje.

Como líneas de trabajo futuras, se propone explorar cuatro direcciones: extender el modelo a otras asignaturas del área de ciencias exactas; incorporar fuentes de datos complementarias como registros de plataformas digitales, asistencia y calificaciones parciales; evaluar el impacto real de las intervenciones pedagógicas mediante un diseño cuasi-experimental con grupo de control; y explorar modelos de lenguaje preentrenados que ofrezcan representaciones semánticas más ricas y sensibles al contexto disciplinar específico.

En un plano más amplio, este estudio invita a repensar el papel que pueden jugar los datos textuales dentro de la evaluación formativa en educación superior. La evaluación tradicional sigue siendo predominantemente cuantitativa: exámenes, tareas, calificaciones numéricas. Esos instrumentos tienen su lugar y su validez, pero presentan una limitación estructural importante: llegan tarde. Miden el resultado del aprendizaje una vez que ya ocurrió, no el proceso mientras se está desarrollando. El texto escrito, en cambio, especialmente cuando se produce en condiciones naturales y sin la presión directa de una calificación, ofrece una ventana distinta: permite asomarse a cómo está pensando el estudiante en ese momento. Incorporar ese tipo de evidencia al ecosistema de evaluación de una asignatura no implica desplazar los instrumentos existentes, sino agregarles una capa de información que antes simplemente se descartaba porque no había herramientas para procesarla de manera sistemática.

A esto se suma otro argumento a favor de la propuesta: su escalabilidad. Una vez entrenado el modelo con los datos de un grupo, aplicarlo a nuevos estudiantes es computacionalmente sencillo. No es necesario reentrenarlo cada semestre si la asignatura y las condiciones institucionales se mantienen estables. Con ajustes menores, el mismo esquema puede extenderse a grupos sucesivos, y con cada ciclo escolar el volumen de datos crece, lo que a su vez mejora progresivamente la calidad del clasificador. El costo más alto, que corresponde a la etapa inicial de recolección y etiquetado de datos, se distribuye y amortiza a lo largo de múltiples periodos, lo que hace de esta una inversión sostenible a mediano plazo.

Pero hay algo que los números no dicen por sí solos y que merece ser dicho con claridad: detectar quién está en riesgo no cambia nada si esa información no llega al docente a tiempo y de una forma que le permita actuar. La verdadera utilidad de estas herramientas no reside en el porcentaje de exactitud que aparece en una tabla; reside en la posibilidad concreta de acortar la distancia entre el momento en que un estudiante empieza a perder el hilo y el momento en que alguien interviene. Esa ventana de oportunidad, que en la dinámica habitual del semestre suele cerrarse antes del primer examen parcial, es exactamente lo que este tipo de modelos puede mantener abierta.

En contextos donde el número de estudiantes por docente es elevado y el tiempo disponible para el seguimiento individual es escaso, contar con un indicador objetivo basado en el propio texto del alumno no es un privilegio ni un recurso accesorio: es una herramienta de equidad. No todos los estudiantes que atraviesan dificultades las hacen visibles de manera espontánea. Algunos no faltan, no protestan, no preguntan; simplemente guardan silencio hasta que reprobar se vuelve casi inevitable. Detectar esa dificultad silenciosa, la que pasa desapercibida en el aula pero deja huellas en la escritura, es quizás el aporte más duradero que este trabajo puede ofrecer a quienes enseñan cada día.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, a la Subdirección de Posgrado e Investigación y a la División de Ingeniería en Sistemas Computacionales por las facilidades otorgadas para la recolección de datos y la realización de la investigación, así como a los estudiantes participantes por su disposición y compromiso durante el desarrollo del estudio.

VI. REFERENCIAS

Baker, R. S., & Inventado, P. S. (2014). Educational data mining and learning analytics. En J. A. Larusson & B. White (Eds.), *Learning analytics: From research to practice* (pp. 61–75). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3305-7_4

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, *20*(3), 273–297. https://doi.org/10.1007/BF00994018

Dorier, J. L., & Sierpinska, A. (2001). Research into the teaching and learning of linear algebra. En D. Holton (Ed.), *The teaching and learning of mathematics at university level* (pp. 255–273). Springer. https://doi.org/10.1007/0-306-47231-7_24

Hand, D., Mannila, H., & Smyth, P. (2001). *Principles of data mining*. MIT Press.

Kolman, B., & Hill, D. R. (2006). *Álgebra lineal* (8.ª ed.). Pearson Educación.

Kotsiantis, S. B. (2012). Use of machine learning techniques for educational purposes: A decision support system for forecasting students' grades. *Artificial Intelligence Review, 37*(4), 331–344. https://doi.org/10.1007/s10462-011-9234-x

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics, 33*(1), 159–174. https://doi.org/10.2307/2529310

Manning, C. D., Raghavan, P., & Schütze, H. (2008). *Introduction to information retrieval*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511809071

Mitchell, T. M. (1997). *Machine learning*. McGraw-Hill.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., y Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research, 12*, 2825–2830.

Romero, C., & Ventura, S. (2010). Educational data mining: A review of the state of the art. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 40*(6), 601–618. https://doi.org/10.1109/TSMCC.2010.2053532

Salton, G., & Buckley, C. (1988). Term-weighting approaches in automatic text retrieval. *Information Processing & Management, 24*(5), 513–523. https://doi.org/10.1016/0306-4573(88)90021-0

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización [Conceptualization]	Tonatzin Isabel Campino Aguirre
2	Curación de datos [Data curation]	Tonatzin Isabel Campino Aguirre
3	Análisis formal [Formal analysis]	Elda Moreno Núñez
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	
5	Investigación [Investigation]	Tonatzin Isabel Campino Aguirre
6	Methodología [Methodology]	Karla Verónica Rodríguez Lozano
7	Administración del proyecto [Project administration]	Elda Moreno Núñez
8	Recursos [Resources]	Karla Verónica Rodríguez Lozano
9	Software [Software]	Tonatzin Isabel Campino Aguirre
10	Supervision [Supervision]	Elda Moreno Núñez
11	Validación [Validation]	*Tonatzin Isabel Campino Aguirre*
12	Visualización [Visualization]	Karla Verónica Rodríguez Lozano
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Elda Moreno Núñez
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Tonatzin Isabel Campino Aguirre

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID110

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

31 Aniversario 1995 - 2026
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Año: 2026 Volumen: 2 Numero: 12 ISSN: 2448-623X Revista Digital Universitaria

Controladores Adaptables Robustos para Regular la Altitud de un Dron Tipo Quadrotor.

Robust Adaptive Controllers for Regulating the Altitude of a Quadcopter Drone.

Espinoza-Fraire, A.T.[1]; Najera-Pérez, A.[2]; Betancourt-Chávez, J.R.[3]; Sáenz-Esqueda, J.A.[4]

Datos de Adscripción:

[1]✉ Espinoza Fraire, Arturo Tadeo
Universidad Juárez del Estado de Durango. Gómez Palacio, Durango. México.
atespinoza@ujed.mx
https://orcid.org/0000-0001-5619-7744

[2] Najera Pérez, Abel
Universidad Juárez del Estado de Durango. Gómez Palacio, Durango. México.
1162152@alumnos.ujed.mx
https://orcid.org/0009-0006-8822-0893

[3] Betancourt Chávez, Julio Roberto
Universidad Juárez del Estado de Durango. Gómez Palacio, Durango. México.
jbetancourt@ujed.mx
https://orcid.org/0000-0003-4815-6859

[4] Sáenz Esqueda, José Armando
Universidad Juárez del Estado de Durango. Gómez Palacio, Durango. México.
jsaenz@ujed.mx
https://orcid.org/0000-0002-6567-2946

Resumen **- este trabajo presenta el control de altitud para un vehículo aéreo no tripulado de cuatro rotores, conocido como dron tipo quadrotor. El objetivo es mantener una altura fija durante un vuelo real, lo cual representa un desafío importante al realizar pruebas con drones de cualquier tipo; podría decirse que es el primer problema por resolver. Lo anterior cobra suma importancia cuando se desean realizar tareas de inspección de obras civiles, monitoreo de catástrofes y aplicaciones en la agricultura de precisión, entre otras. La dificultad en un vuelo real con un dron radica en que durante todo el vuelo se presentan perturbaciones por ráfagas de viento; por ello, en este trabajo se proponen cuatro controladores robustos para la regulación de la altura de un dron tipo quadrotor y se realiza una comparativa para determinar cuál de ellos presenta el mejor desempeño. Los controladores robustos propuestos se basan en la técnica de control no lineal backstepping adaptable y en la metodología por modos deslizantes; de las anteriores se desprenden las cuatro propuestas que se presentan a continuación: backstepping adaptable, backstepping adaptable con modos deslizantes de primer orden, backstepping adaptable con modos deslizantes de segundo orden y, finalmente, backstepping con modos deslizantes de alto orden. Los resultados presentados en este trabajo son de carácter experimental tras realizar varias pruebas de vuelo real en exteriores (no son simulaciones numéricas por computadora).**

Palabras Clave: Backstepping, Dron, Modos Deslizantes, Quadrotor , Robusto.

Abstract **- This paper presents altitude control for a quadrotor unmanned aerial vehicle, commonly known as a quadrotor drone. The objective is to maintain a constant altitude during flight, which is a significant challenge when testing drones of any type; arguably, it is the primary problem to solve. This is especially important when performing tasks such as civil works inspections, disaster monitoring, and precision agriculture applications, among others. Real-world drone flight is difficult because wind gusts and other disturbances are constantly present throughout the flight. Therefore, this paper proposes four robust controllers for regulating a quadrotor drone's altitude and compares them to determine which controller performs best. The proposed robust controllers are based on adaptive backstepping nonlinear control and sliding-mode methodology. From the above, the following four proposals emerge: adaptive backstepping, adaptive backstepping with first-order sliding modes, adaptive backstepping with second-order sliding modes, and finally, backstepping with high-order sliding modes. The results presented in this work are experimental, obtained from several real-world outdoor flight tests (not numerical computer simulations).**

Keywords: Backstepping, Drone, Quadrotor, Robust, Sliding Mode.

I. INTRODUCCIÓN

Los vehículos aéreos no tripulados, por sus siglas VANTs o UAVs en inglés, representan en la actualidad un sinnúmero de aplicaciones; algunas de ellas son: inspección de obra, levantamientos topográficos, cálculo de curvas de nivel, agricultura de precisión, inspección de zonas arqueológicas, entre otras (Espinoza Fraire et al., 2021a).

Cabe mencionar que, al llevar a cabo alguna de las aplicaciones anteriores, están presentes las perturbaciones externas, que pueden ser ráfagas de viento, altas temperaturas, lluvia, etc. (Espinoza Fraire et al., 2022b). Entonces, para poder llevar a cabo alguna aplicación que se desea, es necesario contar con un controlador de vuelo robusto que tenga la capacidad de mantenerse en vuelo estable a pesar de alguna perturbación externa (Castillo García, Lozano, Dzul., 2005). Es por ello que en este trabajo se proponen cuatro controladores adaptables robustos y se lleva a cabo una comparación de los mismos para concluir qué controlador presenta un mejor desempeño. Cabe mencionar que las leyes de adaptación, a su vez, realizan estimaciones de las perturbaciones por ráfagas de viento y logran eliminar o atenuar dichas perturbaciones, con el objetivo de mantener la altura deseada en un VANT del tipo quadrotor.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID111

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

En este trabajo se enfoca el diseño de un controlador robusto para mantener la altura del VANT, ya que es una parte crítica al llevar a cabo tareas o aplicaciones con drones. La parte de control de los ángulos de Euler se realiza mediante un controlador lineal del tipo proporcional-derivativo (PD) (Kelly, S., Santibañéz, V., 2003).
Los resultados presentados en este trabajo son de carácter experimental y sirven para comprobar el funcionamiento de los controladores robustos propuestos.

En la literatura científica es posible encontrar otros trabajos en los cuales buscan optimizar el tiempo de convergencia a la altura deseada con el menor gasto de energía posible por parte de los motores del quadrotor, lo anterior lo buscan solucionar utilizando la teoría de control óptimo en tiempo discreto, específicamente la ley de control está basada en un regulador cuadrático lineal o por sus siglas en idioma inglés LQR (Linear Quadratic Regulator) (Santos, O. et al., 2014).

Por otra parte, en (Du, H., Pu, Z., Yi, J., Qian, H., 2016) se presenta una ley de control aplicada al despegue de un quadrotor. Para el diseño del controlador, establecen un modelo dinámico que describe al quadrotor, considerando la fuerza de Coriolis, el efecto giroscópico y el efecto suelo. Cabe mencionar que en Du, H., Pu, Z., Yi, J., Qian, H. (2016) desacoplan el sistema de control del quadrotor en tres bucles de control: un bucle de posición, un bucle de ángulo y un bucle interno. La ley de control propuesta en (Du, H., Pu, Z., Yi, J., Qian, H., 2016) se basa en la inversión dinámica no lineal incremental. Para lograr el rechazo de perturbaciones y la atenuación del ruido de medición, se incorpora un observador de estado extendido integral (IESO) en este esquema de control.

Como se puede apreciar en (Wan, B., 2023) las perturbaciones externas también les afectan a aeronaves de mayor tamaño, el trabajo de (Wan, B., 2023) puede tomarse como referencia para resaltar la relevancia del tema y la búsqueda de soluciones no solamente en drones sino también en aeronaves de una mayor envergadura.

En (Beck, H., 2016), se presenta un método de implementación para el despegue y aterrizaje autónomo de un quadrotor o cuadricóptero sobre una plataforma fija. La medición de altitud se optimiza mediante un sensor LiDAR y una unidad de medición inercial; para obtener señales con el menor ruido posible, se aplica un filtro de Kalman. Las ecuaciones para la trayectoria de despegue y de aterrizaje utilizan comandos de posición y de velocidad. Se emplea una ley de control robusta no lineal, de retroalimentación por pasos, basada en la técnica de control no lineal backstepping. El sistema de pruebas quadrotor está programado en C/C++ y con ROS (Robot Operating System).

Por otra parte, en (Komiyama et al, 2025), se presenta una solución al seguimiento de trayectorias con un quadrotor que está sujeto a perturbaciones por ráfagas de viento, para solucionar este problema, proponen un método de control compuesto que utiliza un Observador Adaptativo de Perturbaciones de Modo Deslizante Super-Twisting (ASTSMDO), el cual obliga al sistema a seguir el modelo nominal del MPC, cabe mencionar que los resultados presentados en (Komiyama et al, 2025) son en simulación numérica.

El problema de regular la altura para un aterrizaje exitoso de un quadrotor por medio de un sistema de visión es propuesto en (Liu et al., 2019), donde se ha diseñado una plataforma de aterrizaje con marcadores ópticos de diferentes tamaños para garantizar su reconocimiento robusto a distintas distancias, lo anterior para proporcionar información fiable sobre la posición en un entorno sin GPS (Sistema de Posicionamiento Global), en (Liu et al., 2019) implementan un algoritmo de visión para el reconocimiento en tiempo real de la plataforma de aterrizaje y la estimación de la posición. En (Liu et al., (2019) no consideran las perturbaciones por ráfagas de viento ya que las pruebas experimentales son realizadas en interiores en un ambiente controlado.

Una propuesta interesante se presenta en Yongjun (2023), en la cual se propone un enfoque de control adaptativo de modo deslizante sin modelo (MFASMC) para drones de cuatro rotores (quadrotor). Este enfoque elimina la dependencia del modelo de cuatro rotores propia del control basado en modelos. Solo se utilizan los datos de entrada y salida del sistema aéreo no tripulado para abordar los problemas de modelado dinámico y de identificación de parámetros. La técnica que se utiliza en (Yongjun, 2023) se divide en dos fases para el control de actitud del cuadricóptero: el algoritmo de control de modo deslizante incorpora un diseño de control de posición en el bucle externo para minimizar el impacto de las perturbaciones externas y obtener un rendimiento robusto del sistema aéreo no tripulado.

Entonces, las contribuciones de este trabajo en comparación con los mencionados en la parte superior son las siguientes:

- El diseño de controladores adaptables y robustos frente a perturbaciones externas, como ráfagas de viento, en un dron de cuatro rotores.
- La obtención de resultados experimentales (no simulaciones por computadora).
- Ensamblado estructural, diseño electrónico, programación y puesta en vuelo de un quadrotor.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

En esta sección se presenta el modelo dinámico que describe al dron de tipo quadrotor y se describen las leyes de control robustas propuestas para el control en altura del quadrotor.

2.1 Modelo dinámico de dron tipo quadrotor

El modelo dinámico definido para el quadrotor se compone de tres espacios vectoriales que definen la aceleración lineal, la velocidad angular y la aceleración angular (Castillo García, Lozano, Dzul, 2005). Iniciaremos definiendo el vector de la aceleración lineal que está dado por:

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID111

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g\sin\theta \\ -g\sin\phi\cos\theta \\ -g\cos\phi\cos\theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -2(v_z w_y - v_y w_z) \\ -2(v_x w_z - v_z w_x) \\ -2(v_y w_x - v_x w_y) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2\frac{m_w}{m}(v_y(w_1+w_2+w_3+w_4)) \\ -2\frac{m_w}{m}(v_y(w_1+w_2+w_3+w_4)) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m}b(w_1^2+w_2^2+w_3^2+w_4^2) \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

donde g es la constante gravitacional; la rotación en el eje está definida por , por otra parte , θ es la rotación en el eje- y , ψ define a la rotación en el eje- z , estas rotaciones corresponden a cabeceo, guiñada y alabeo, respectivamente. Las velocidades angulares están dadas por w_x, w_y, w_z . Las velocidades lineales están definidas por v_x, v_y, v_z sobre los ejes x, y, z , respectivamente (ver la Figura 1). El segundo vector está definido para las velocidades angulares; determina los cambios del marco fijo (MQ) del quadrotor con respecto al marco fijo terrestre (MT). Entonces, el vector de velocidades angulares está dado por:

$$\underline{\Omega} = \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_x + w_y\sin\phi\tan\theta + w_z\cos\phi\tan\theta \\ w_y\cos\phi - w_z\sin\phi \\ w_y\frac{\sin\phi}{\cos\theta} + w_z\frac{\cos\phi}{\cos\theta} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

El último vector representa las aceleraciones angulares en el quadrotor:

$$\underline{\Theta} = \begin{pmatrix} \dot{w}_x \\ \dot{w}_y \\ \dot{w}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{I_x}l\cdot b(w_4^2 - w_2^2) \\ \frac{1}{I_y}l\cdot b(w_3^2 - w_1^2) \\ \frac{1}{I_z}d(w_2^2 + w_4^2 - w_1^2 - w_3^2) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -\frac{1}{I_x}(w_y w_z(I_z - I_y)) \\ -\frac{1}{I_y}(w_x w_z(I_x - I_z)) \\ -\frac{1}{I_z}(w_x w_y(I_y - I_x)) \end{pmatrix} (1.3)$$

$$\times \begin{pmatrix} -\frac{1}{I_x}(w_y I_w(w_1+w_2+w_3+w_4)) \\ -\frac{1}{I_y}(w_x I_w(w_1+w_2+w_3+w_4)) \\ 0 \end{pmatrix}$$

donde I_w es el momento de inercia del motor. I_x, I_y, I_z representan la inercia en los ejes x, y, z , respectivamente (García Carrillo, L.R., Dzul López, A.E., Lozano, R., Pégard, C., 2012). La longitud del brazo de la estructura del quadrotor está definida por l . En la Figura 2 se representan las fuerzas que actúan durante el despegue del dron tipo quadrotor.

Figura 1
Marco inercial, ejes y ángulos de Euler en quadrotor.

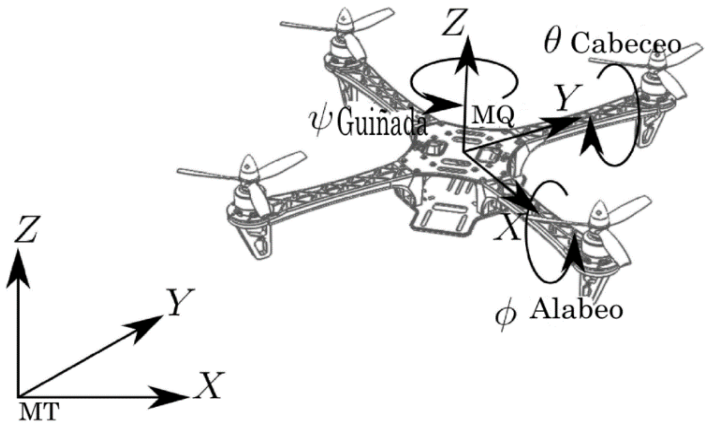
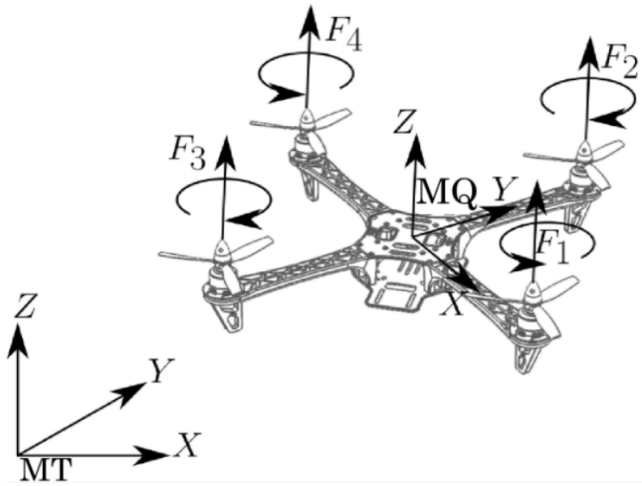


Figura 2
Fuerzas de empuje en quadrotor.



2.2 Diseño de las leyes de control

Para el diseño de las leyes de control se consideran las ecuaciones que definen el vector de velocidades angulares (1.2) y el vector de aceleraciones angulares (1.3).
Para el control de los ángulos de Euler se utilizará un controlador lineal del tipo proporcional-derivativo (PD) (Kelly, S., Santibáñez, V., 2003), este controlador está definido por:

$$u_* = k_{p*}e_* + k_{d*}\dot{e}_* \quad (1.4)$$

donde $k_{p*}, k_{d*} \succ 0$ son las ganancias a sintonizar del controlador, e_* define el error de cada ángulo de Euler en el quadrotor si se define un vector $* = [\phi \quad \theta \quad \psi]^T$, el error está dado por $e_* = \underline{\Theta}^d - \underline{\Theta}$, con $\underline{\Theta}^d = [\phi^d \quad \theta^d \quad \psi^d]^T$ y se considera que. La derivada del error está dada por $\dot{e}_* = \underline{\Omega}^d - \underline{\Omega}$, con

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID111

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

$\underline{\Omega}^d = [w_x^d \quad w_y^d \quad w_z^d]^T$. En las ecuaciones (1.2) y (1.3) se definieron los vectores $\underline{\Theta}$ y $\underline{\Omega}$, respectivamente.

Para desarrollar los controladores adaptables robustos se utilizará el elemento a_z del vector de aceleraciones lineales presentado en la ecuación (1.1). Para iniciar la construcción de dicho controlador adaptable robusto, se define un error de altura , donde es la altura actual dada por el sensor de altitud montado en el quadrotor y es la altura deseada hacia la que se busca que converja el quadrotor en vuelo.

Entonces, se define una función candidata de Lyapunov del error e_z:

$$V_1 = \frac{1}{2} e_z^2 \tag{1.5}$$

derivando a (1.5) y una función de retroceso $z_2 = \dot{z} - \alpha_1$, con $\alpha_1 = \dot{z}^d - k_1 e_z$ y $k_1 \succ 0$. Después de las operaciones algebraicas se tiene que:

$$\dot{V}_1 = z_2 e_z - k_1 e_z^2 \tag{1.6}$$

Se define una segunda función candidata de Lyapunov para lograr estabilidad asintótica y completar la parte adaptable del controlador robusto (Kristic, M., Kokotovic, P., Kanellakopoulos, I., 1995):

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2\gamma}(w - \hat{w}) \tag{1.7}$$

donde w es la perturbación externa por ráfagas de viento, y $\hat{w}$ define la estimación de la perturbación mencionada. Entonces derivando la ecuación (1.7) y con la ley de control backstepping adaptable está definida por:

$$u_z = (g\cos\phi\cos\theta - e_z - \hat{w} - k_2 z_2)\frac{m}{b} \tag{1.8}$$

donde $k_2 \succ 0$ es una ganancia del controlador, m es el peso del quadrotor en kilogramos, b es la distancia del centro del quadrotor al extremo de un brazo del marco del dron, y $\hat{w}$ se obtiene de derivar la ley de adaptación $\dot{\hat{w}} = \gamma z_2$. Así, la derivada de la función candidata de Lyapunov está dada por la ecuación (1.7) está dada por:

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_z^2 - k_2 z_2^2 \leq 0 \tag{1.9}$$

Entonces, con el controlador adaptable robusto propuesto en la ecuación (1.8) se alcanza la estabilidad asintótica para el control en altura de un dron tipo quadrotor (Khalil, H., 2001). Para evitar una definición redundante en el diseño de los controladores robustos, las ecuaciones para iniciar con el diseño se utilizan la ecuación (1.5) y se termina la construcción en la ecuación (1.8), utilizando la misma estructura del controlador, pero cambiando la estimación $\dot{\hat{w}}$ con técnicas basadas en la metodología por modos deslizantes y así aprovechar la robustez inherente en dicha metodología.

Así, la estimación con modos deslizantes de primer orden está definida por (Shtessel et al., 2013):

$$\dot{\hat{w}} = \gamma_1 \operatorname{sgn}(z_2) \tag{1.10}$$

donde γ_1 es una ganancia positiva definida. La estimación por modos deslizantes de segundo orden está dada por:

$$\dot{\hat{w}} = \gamma_1 \operatorname{sgn}(z2) + \gamma_2 \operatorname{sgn}(\dot{z}_2) \tag{1.11}$$

con γ_1, γ_2 como ganancias positivas. Finalmente, el diseño del estimador por modos deslizantes de alto orden es:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{w}} &= \gamma_1 \operatorname{sgn}(z_2) + \gamma_2 \operatorname{sgn}(\ddot{z}_2 + 2|\dot{z}_2|^3 + |z_2|^2)^{1/6} \\ &\times \operatorname{sgn}(\dot{z}_2 + |z_2|^{2/3} \cdot \operatorname{sgn}(z_2))\end{aligned} \tag{1.12}$$

donde $\gamma_1, \gamma_2 \succ 0$.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos con los controladores robustos propuestos en este trabajo para el control de altura de un vehículo aéreo no tripulado del tipo quadrotor o de cuatro motores.

Para realizar una comparación entre los controladores se utiliza la norma L_2 (Khalil, H., 2001). Esta norma se aplicó a todos los resultados obtenidos en la experimentación con los controladores adaptables robustos.

Entonces, se obtienen las normas de error y de esfuerzo de cada controlador estudiado en el presente trabajo. Así, la norma L_2 para el error está dada por:

$$\mathrm{L_2[e_z]} = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{T\text{-}t_0}} \int_{t_0}^{\mathrm{T}} \|\mathrm{e_z}\|^2 \, \mathrm{dt}} \tag{1.13}$$

La norma L_2 para obtener el esfuerzo del controlador está definida como:

$$L_2[u_z] = \sqrt{\frac{1}{T - t_0} \int_{t_0}^{T} \|u_z\|^2 \, dt} \tag{1.14}$$

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos con la norma para el error y los esfuerzos del controlador.

TABLA 1

NORMA L_2 DE LOS ERRORES Y ESFUERZOS DE LOS CONTROLADORES

Controlador	$e_z[mts]$	$u_z[duty-cycle]$
Backstepping Adaptable	0.3075	144.2742
Backstepping adaptable con Modos deslizantes de primer orden.	0.3412	141.0926
Backstepping adaptable con Modos deslizantes de segundo orden.	0.2930	142.5053
Backstepping Adaptable con Modos		

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID111

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

deslizantes de alto orden.

	0.2662	143.7849

En las Figuras 3 y 4 se presentan las respuestas de los ángulos de Euler y las velocidades angulares durante las pruebas de control en altura aplicando la ley de control adaptable backstepping, respectivamente. La estimación de la perturbación externa durante la prueba de vuelo se presenta en la Figura 5. Por otra parte, la respuesta de control basada en la teoría de control adaptable por backstepping se muestra en la Figura 6.

Finalmente, la Figura 7 presenta la regulación de la altura del quadrotor. Cabe mencionar que la altura deseada es de un metro para todas las pruebas realizadas. Con base en los resultados de la Tabla 1, el error del controlador adaptable backstepping es menor que el de los controladores adaptables robustos con modos deslizantes de segundo orden, pero el esfuerzo del controlador adaptable backstepping es mayor que el de los otros tres controladores adaptables robustos con la metodología por modos deslizantes que se presentan en este trabajo.

Figura 3
Respuesta de los ángulos de Euler con el controlador adaptable de backstepping.

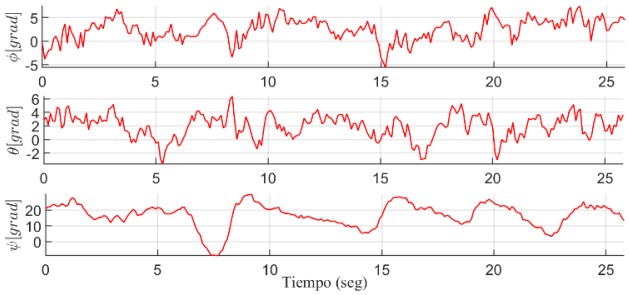


Figura 4
Respuesta de las velocidades angulares al aplicar el controlador backstepping adaptable: resultados experimentales.

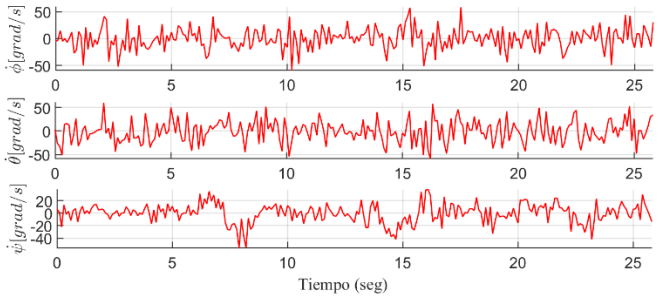


Figura 5
Estimación de la perturbación externa mediante el controlador backstepping adaptable: resultados experimentales.

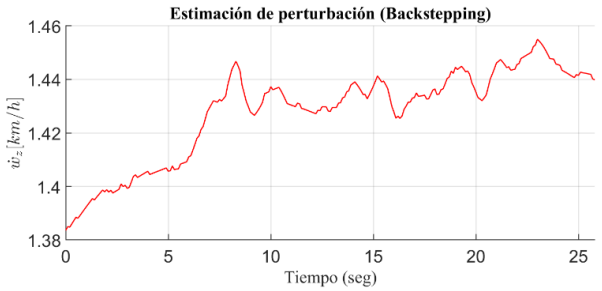


Figura 6
Respuesta del controlador adaptable de backstepping, resultados experimentales.

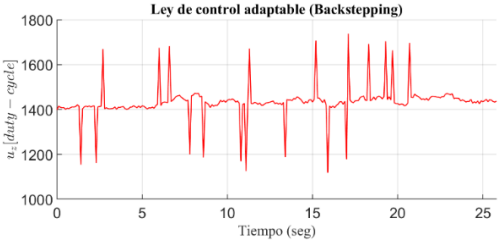
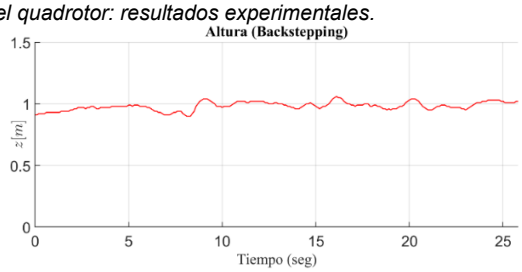


Figura 7
Respuesta del controlador backstepping adaptable en la regulación de la altura del quadrotor: resultados experimentales.



Las Figuras 8 y 9, presentan la respuesta de los ángulos de Euler y las velocidades angulares al aplicar el controlador adaptable backstepping de primer orden en altura, respectivamente. La estimación de la perturbación externa sobre el quadrotor se presenta en la Figura 9. La Figura 10 presenta la estimación de la perturbación externa aplicando el controlador backstepping adaptable con modos deslizantes de primer orden.

La Figura 11 presenta la respuesta del controlador adaptable con modos deslizantes de primer orden. Finalmente, en la Figura 12 se tiene la regulación de la altura del quadrotor, en la cual se aprecian oscilaciones sobre la altura deseada de un metro.

Basándose en los resultados de la Tabla 1, el controlador adaptable con modos deslizantes de primer orden presentó el mayor error al regular la altura del quadrotor sobre el valor deseado de un metro, lo anterior en comparación con los controladores basados en backstepping adaptable, backstepping adaptable con modos deslizantes de segundo orden y el controlador backstepping adaptable con modos deslizantes de alto orden.

Figura 8
Respuesta de los ángulos de Euler aplicando el controlador backstepping adaptable con modos deslizantes de primer orden, resultados

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID111

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

experimentales.

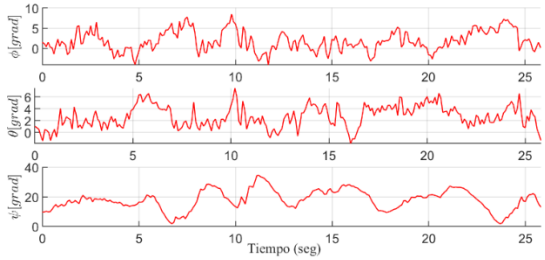


Figura 9
Respuesta de las velocidades angulares aplicando el controlador backstepping adaptable con modos deslizantes de primer orden, resultados experimentales.

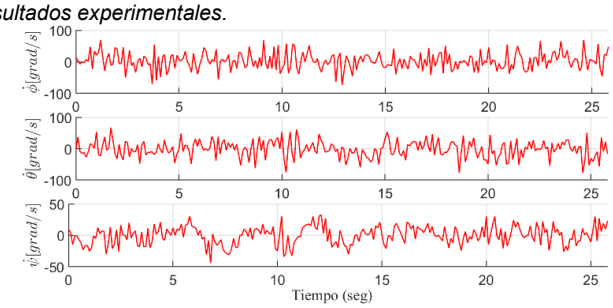


Figura 10
Estimación de la perturbación externa aplicando el controlador backstepping adaptable con modos deslizantes de primer orden, resultados experimentales.

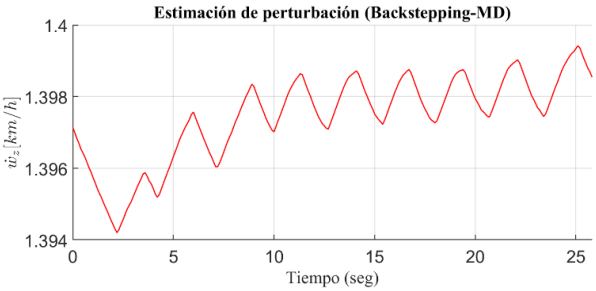


Figura 11
Respuesta del controlador backstepping adaptable con modos deslizantes de primer orden, resultados experimentales.

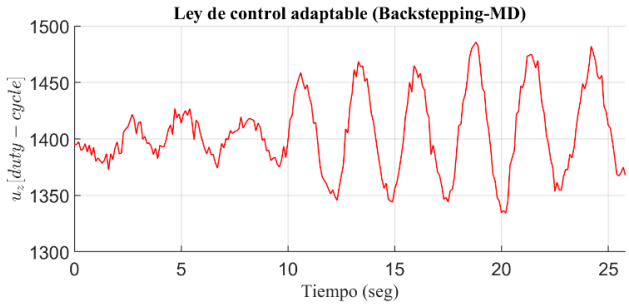
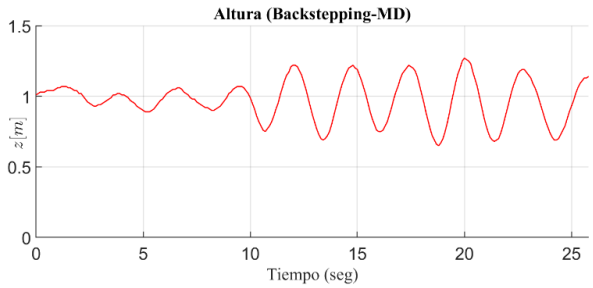


Figura 12
Respuesta del controlador backstepping adaptable con modos deslizantes de primer orden en regulación de altura del quadrotor, resultados experimentales.



La respuesta obtenida con el controlador adaptable con modos deslizantes de segundo orden para los ángulos de Euler y las velocidades angulares se presenta en la Figura 13 y la Figura 14, respectivamente.

La Figura 15 muestra la estimación de la perturbación, y la Figura 16 presenta la respuesta de control adaptable con modos deslizantes de segundo orden. Finalmente, la Figura 17 muestra la regulación de la altura del quadrotor, la cual presenta oscilaciones sobre la altura deseada de un metro aplicando el controlador adaptable con modos deslizantes de segundo orden.

Los resultados del análisis con la norma vectorial se presentan en la Tabla 1 y se aprecia que, utilizando el controlador adaptable de segundo orden, se tiene un menor error y un menor esfuerzo de control al ser comparado con el control backstepping adaptable.

Figura 13
Respuesta de los ángulos de Euler aplicando el controlador backstepping adaptable con modos deslizantes de segundo orden, resultados experimentales.

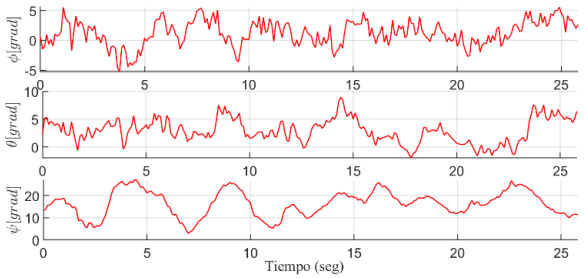


Figura 14
Respuesta de las velocidades angulares aplicando el controlador backstepping adaptable con modos deslizantes de segundo orden, resultados experimentales.

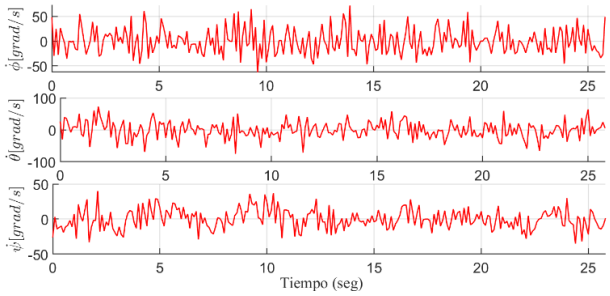


Figura 15
Estimación de la perturbación externa mediante el controlador adaptable de backstepping con modos deslizantes de segundo orden.

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID111

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

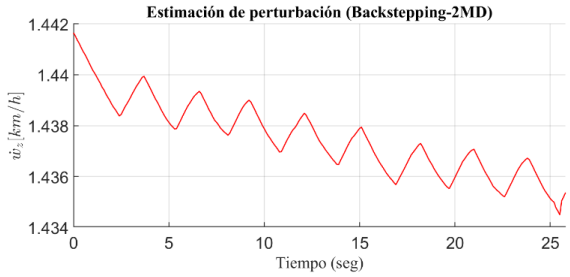


Figura 16
Respuesta del controlador adaptable de backstepping con modos deslizantes de segundo orden: resultados experimentales.

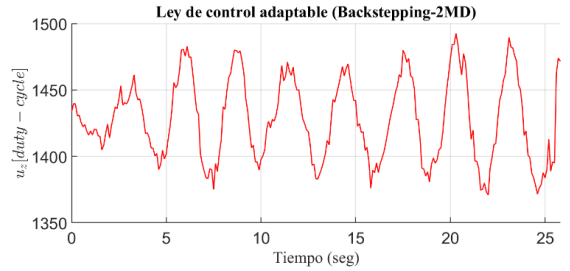
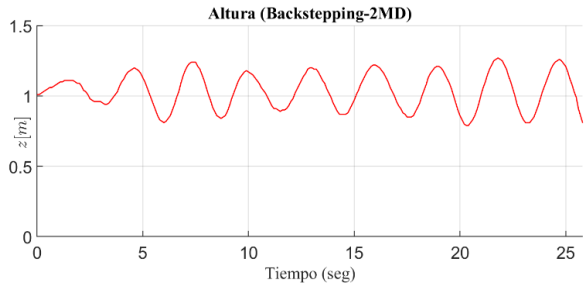


Figura 17
Respuesta del controlador backstepping adaptable con modos deslizantes de segundo orden en la regulación de la altura del quadrotor: resultados experimentales.



Por último, se presentan en las Figuras 18 y 19 las respuestas de los ángulos de Euler y las velocidades angulares con el control backstepping adaptable con modos deslizantes de alto orden, respectivamente.

Figura 18
Respuesta de los ángulos de Euler aplicando el controlador adaptable de backstepping con modos deslizantes de alto orden: resultados experimentales.

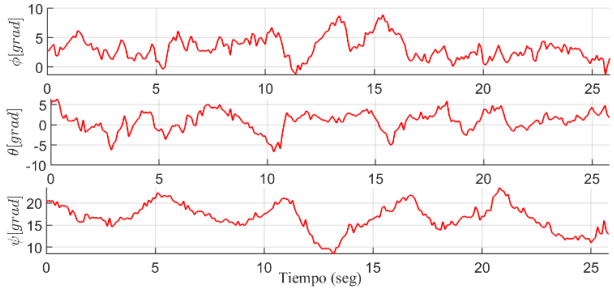
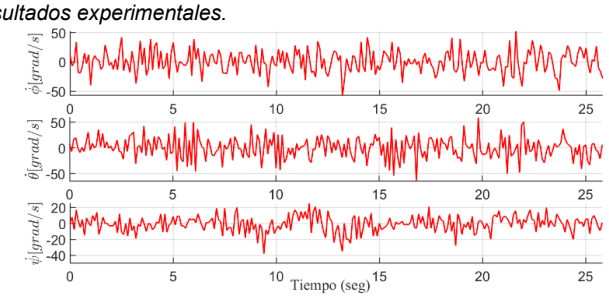


Figura 19
Respuesta de las velocidades angulares aplicando el controlador adaptable de backstepping con modos deslizantes de alto orden: resultados experimentales.



La Figura 20 muestra la estimación de la perturbación externa; la Figura 21 y la Figura 22 presentan la respuesta del controlador backstepping adaptable con modos deslizantes de alto orden y el resultado obtenido al regular la altura deseada a un metro, respectivamente.

Con base en el análisis presentado en la Tabla 1, el controlador backstepping adaptable de alto orden presentó el menor error al regular la altura deseada, pero para lograr dicha regulación de altitud, el esfuerzo del controlador fue mayor que el de los controladores backstepping adaptables basados en primer y segundo orden.

Por otra parte, el esfuerzo de control con el backstepping adaptable de alto orden fue menor que el del controlador backstepping adaptable.

Figura 20
Estimación de la perturbación externa mediante un controlador adaptable de backstepping con modos deslizantes de alto orden: resultados experimentales.

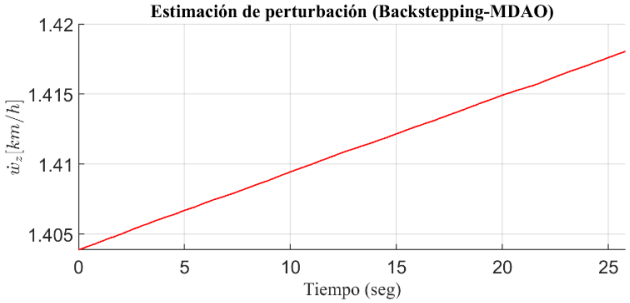


Figura 21
Respuesta del controlador adaptable de backstepping con modos deslizantes de alto orden: resultados experimentales.

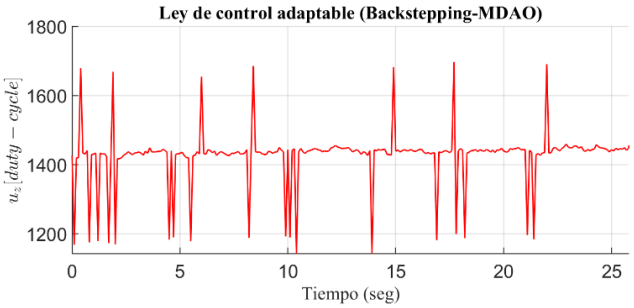
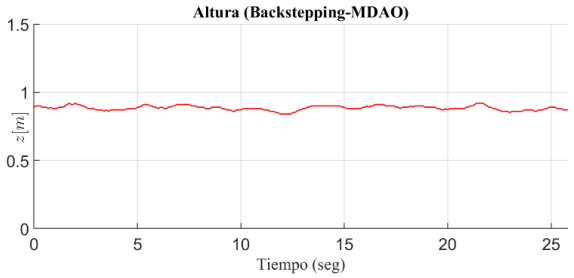


Figura 22
Respuesta del controlador backstepping adaptable con modos deslizantes de alto orden en la regulación de la altura del quadrotor:

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID111

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

resultados experimentales.



IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se proponen leyes de control adaptables, de las cuales tres son robustas al aplicar la teoría de control por modos deslizantes. La robustez se busca para disminuir o eliminar las perturbaciones externas debidas al viento que afectan el mantenimiento de la altura deseada de un dron del tipo quadrotor.

Los resultados se presentan de forma experimental, se llevaron una serie de pruebas de vuelo para lograr la mejor respuesta posible.

Después de haber realizado varios vuelos reales al exterior con el quadrotor bajo las leyes de control (experimentos). Se concluye que el controlador backstepping adaptable con modos de alto orden presentó el menor error al regular la altura deseada de un metro con el quadrotor, pero requirió un mayor esfuerzo de control que las otras dos técnicas con modos deslizantes de primer y segundo orden. Por otra parte, el esfuerzo de control fue menor al comparar el controlador backstepping adaptable de alto orden con el control backstepping adaptable.

Cabe mencionar que el controlador backstepping adaptable presentó el mayor esfuerzo de control entre los controladores presentados en este trabajo. El backstepping adaptable presentó un menor error de altura que el backstepping con modos deslizantes de primer orden.

Los controladores backstepping adaptables de primer y segundo orden presentaron oscilaciones respecto de la altura deseada de 1 metro. Entonces, para trabajos futuros se buscará una mejor sintonización de los controladores que presentaron oscilaciones respecto de la referencia de altura deseada.

Al ser pruebas experimentales, se dificulta mucho la sintonización de las ganancias y lleva mucho tiempo obtener respuestas que al menos oscilen en torno a la referencia deseada. Lo anterior es uno de los inconvenientes de realizar pruebas de vuelo con drones.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo por parte de la Facultad de Ingeniería, Ciencias y Arquitectura de la Universidad Juárez del Estado de Durango para la realización de este trabajo de investigación.

VI. REFERENCIAS

Beck, H., Lesueur, J., Charland, G., Akhrif, O., Gagné, S., Gagnon, F., Couillard, D. (2016, 7-10 de junio de 2016). *Autonomous takeoff and landing of a quadrotor*. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Arlington, VA, USA. 10.1109/ICUAS.2016.7502614

Castillo García, P., Lozano, R., Dzul López, A.E. (2005). Modeling and Control of Mini-Flying Machines. Springer.

Du, H., Pu, Z., Yi, J., Qian, H. (2016, 12-14 de agosto de 2016). Advanced Quadrotor Takeoff Based on Incremental Nonlinear Dynamic Inversion and Integral Extended State Observer. Proceedings of 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference, Nanjing, China. DOI:10.1109/CGNCC.2016.7829076

Espinoza Fraire, A.T., Sáenz Esqueda, J.A., Del Río Santana, O., Gómez Córdoba, F.J., López Carrillo, N.V. (2021a). Aplicaciones de Drones en Ingeniería Civil: Topografía, Inspección de Obra y Estructuras. Alfaomega.

Espinoza Fraire, A.T., Dzul López, A.E., Parada Morado, R.P., Sáenz Esqueda, J.A. (2022b). Design of Control Laws and State Observers for Fixed-Wing UAV's. Elsevier.

García Carrillo, L.R., Dzul López, A.E., Lozano, R., Pégard, C. (2012). Quad Rotorcraft Control. Springer.

Kelly, S., Santibáñez, V. (2003). Control de Movimiento de Robots Manipuladores. Pearson Hall.

Kristic, M., Kokotovic, P., Kanellakopoulos, I. (1995). Nonlinear and Adaptive Control Design. Wiley-Interscience.

Komiyama, S., Uchiyama, K., Masuda, K. (2025). Combined Robust Control for Quadrotor UAV Using Model Predictive Control and Super-Twisting Algorithm, Drones MDPI, Num 9, https://doi.org/10.3390/drones9080576

Khalil, H. (2001). Nonlinear Systems. Pearson

Liu, X., Zhang, S., Tian, J., Liu, L. (2019). An Onboard Vision-Based System for Autonomous Landing of a Low-Cost Quadrotor on a Novel Landing Pad, Sensors MDPI, 19(21), 19. https://doi.org/10.3390/s19214703

Santos, O., Romero, H. Salazar, S., Lozano, R. (2014, 27-30 de Mayo de 2014). Discrete Optimal Control for a Quadrotor UAV: Experimental Approach. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Orlando, FL, USA. 10.1109/ICUAS.2014.6842368

Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., Levant, A. (2013). Sliding Mode Control and Observation. Birkhauser.

Wan, B., Pan, Z., Su, X., Han, W., Wang, J. (2023, 5 al 7 de Agosto 2022). A Precise Automatic Landing Control Method Based on the MPC-LQG Algorithm. Advances in Guidance, Navigation and Control, 845, Harbin, China. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6613-2_477

Yongjun, D., Jianhong, W., Jinlong, A., Xi, L. (2023). Design of quadrotor attitude controller based on data-driven model-free adaptive sliding mode control, International Journal of Dynamics and Control, 12, 1404-1414, https://doi.org/10.1007/s40435-023-01281-8

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No.	Rol	Descripción *Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre* *Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.*
1	Conceptualización	Arturo Tadeo Espinoza Fraire
2	Curación de datos	Abel Najera Perez
3	Análisis formal	Arturo Tadeo Espinoza Fraire, José Armando Sáenz Esqueda
4	Obtención de fondos	José Armando Sáenz Esqueda
5	Investigación	Arturo Tadeo Espinoza Fraire, Abel Najera Perez
6	Methodología	José Armando Sáenz Esqueda
7	Administración del proyecto	Julio Roberto Betancourt Chávez
8	Recursos	Arturo Tadeo Espinoza Fraire, Abel Najera Perez
9	Software	Abel Najera Perez
10	Supervision	Arturo Tadeo Espinoza Fraire
11	Validación	José Armando Sáenz Esqueda
12	Visualización	Julio Roberto Betancourt Chávez
13	Redacción - borrador original	Arturo Tadeo Espinoza Fraire
14	Redacción - revisión y edición	Julio Roberto Betancourt Chávez

Doi: https://doi.org/10.62805/cid2026.CID111

This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

REVISTA CIENCIA INGENIERIA Y DESARROLLO TEC LERDO

ÍNDICE DE AUTORES

A

Adame de León, Fernando Ulises 184
Adame Delgado, Raymundo 127, 154
Aguirre Mejía, Elena Tzetzangary 250
Álcala Wong, Daniel 250
Alvarado Tovar, Noé 50
Arjona López, Marco Antonio 31
Armendáriz López, Saúl 212

B

Betancourt Chávez, Julio Roberto 285

C

Cabrales Valenzuela, Adán Emilio 193
Caldera Rodríguez, Omar Israel 212
Caldera Sánchez, Christian Javier 1
Camacho Sifuentes, Rita Guadalupe 258
Campa Ramírez, Edson Raúl 50
Campino Aguirre, Tonatzin Isabel 276
Carreón Silva, Luis Miguel 12
Carrera Barraza, Brenda 154
Castro Zenil, Mario Salvador 12
Ceceñas Jacquez, Marco Iván 22
Ceseñas Cordero, María Guadalupe 22
Chairez Fernández, Luis Felipe 212
Coto Fuentes, Hesner 86
Cuevas Zapata, Jessica Ivón 22

D

Delgadillo Delgadillo, Zoila 97

E

Espinoza Fraire, Arturo Tadeo 285

F

Favela Flores, Sergio 97
Flores Luévanos, María Guadalupe 107
Flores, Rivas, Sulma Mónica 146
Fong, Alvarado, Mayela 146

G

García Bautista, José Armando 107
García Hernández, Violeta del Carmen 163
García Morales, Olivia 184
Garza Rosales, Gerardo de Jesús 184, 193
Gasca Ortega, Lizzy Yaretzi 163
Gaucin, Delgado, Alejandra 146
González Aroña, Itzel Sarahim 86
González Flores, Adalberto 41
González Vargas, Luis Amado 50
Guevara Amatón, Karla Victoria 86
Gutiérrez Montoya, José Eduardo 60, 78
Guzmán Ayala, Ana Laura 22

H

Hernández Cuevas, Alberto Adrian 60
Hernández Flores, Concepción 31
Hernández López, Mónica 119, 127, 220
Hernández Rodríguez, Rubén 50
Hernández Sánchez, Josefina 41
Herrera García, José Carlos 107
Huizar Vargas, Oscar 163

J

Juárez Hernández, José María 119, 127, 220
Jurado Bichir, Lorena Elizabeth 60, 78
Jurado Zamarripa, Laura Isela 154

L

Lozano Cuéllar, Leticia 238

M

Machado Díaz, Eduardo 173
Martínez Álvarez, María Montserrat 31
Martínez Macías, Gerardo Alfredo 68
Martínez Mendoza, Alma Fabiola 68
Martínez Rodríguez, Olga Lidia 154
Martínez Rodríguez, Ulises 268
Miranda Guardado, César 184
Montelongo Bocanegra, Jonatan Leonel 78
Morales López, Jesús Enrique 250
Morales, Flores, Rosa María 136, 146
Morales, Venegas, Diana Sarahi 136
Moreno Núñez, Elda 184, 193, 276
Muñoz Castillo, Rubén Ángel 31

N

Nájera Pérez, Abel 285
Navarro Villalobos, Mauricio 97

O

Ochoa Corona, Yisvi Saray 268
Ojeda Núñez, Martha Iveth 60, 78

P

Palomares Ibarra, Karen Adriana 97
Peñaloza Mendoza, Guillermo Rey 12

R

Ramírez Sánchez, Víctor Andrés 60, 78
Ramos Ochoa, Oscar Fabián 268
Regalado Ríos, María Guadalupe 212
Reyna Jiménez, María Guadalupe 97
Rodríguez, Campos, Francisco Eduardo 107, 136
Rodríguez Chacón, Rocio Lorena 136, 229
Rodríguez Lozano, Karla Verónica 107, 276
Rodríguez Martínez, Danna Montserrat 22
Román Landeros, Diego Alberto 173
Ruiz Arroyo, Idalia 250, 268
Ruiz Ayala, José Dolores 250
Ruiz Ponce, Gerardo Enrique 238, 258

S

Sáenz Esqueda, José Armando 285
Salas Rodríguez, Diana Rosa 163
Santos García, Adrián 41
Sellschopp Sánchez, Francisco Sergio 238, 258
Serrano Hernández, Arturo 173
Servín Prieto, Alan Joel 119, 127, 220

T

Tinoco, Alcázar, Irma 136
Torres Camarillo, Gabriela 212

V

Valdez Díaz, José Manuel 154
Valenzuela Martínez, Patricia Abigail 229
Vaquera González, Efraín 204
Vargas Lerma, Jorge Fernando 193
Vásquez Corral, Marcial Humberto 119, 220
Velásquez Chávez, Tania Elizabeth 119, 127, 220
Vidaña Martínez, Silvia Adriana 50

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

REVISTA CIENCIA INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO

Para mayor información, duda o comentario, estamos a su disposición en los siguientes medios:

revistacid@itslerdo.edu.mx | https://revistacid.itslerdo.edu.mx

https://www.lerdo.tecnm.mx

Dirección:

Revista "Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo"

Instituto Tecnológico Superior de Lerdo

Edificio "F", planta alta

Avenida Tecnológico No. 1555 Sur. Periférico Gómez-Lerdo Km. 14.5

C. P. 35150. Ciudad Lerdo, Durango. México

Teléfonos:

+52 (871) 7-25-23-71, 7-25-57-79, y 7-25-58-02 • extensión 134

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

REVISTA CIENCIA INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO

Volumen: 2 • Número: 12 • Año: 2026 ISSN: 2448-623X

La revista "CIENCIA INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO" es una revista anual de difusión digital, que tiene como propósito difundir la producción científica, tecnológica, y de conocimiento; lo anterior, en los ámbitos: académico, científico, tecnológico e industrial; que represente una contribución para el desarrollo de la ciencia y la tecnología.