



GOBIERNO DEL
ESTADO DE
MÉXICO



ESTADO DE
MÉXICO
¡El poder de servir!

EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN



Publicación cuatrimestral del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec. Año 23, noviembre de 2025

TECNOCULTURA

ISSN: 1870-7157

Investigación · Ciencia · Tecnología · Cultura



LABORATORIO
NACIONAL
CONAHCYT
EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL
Y CIENCIA DE DATOS
LNC-IADO

2^{do} Congreso Nacional de Ingeniería Industrial y de Sistemas

“La Era de la Inteligencia Artificial:
Impactos y Oportunidades en la Industria”

20 Y 21 DE MARZO 2025

LÍNEAS TEMÁTICAS

LÍNEA 1: LA ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES, LOGÍSTICA EN TRANSPORTE Y CADENA DE SUMINISTRO ANTE LA INDUSTRIA 4.0.

LÍNEA 2: SISTEMAS DE GESTIÓN DE CALIDAD Y MANUFACTURA.

LÍNEA 3: DESARROLLO HUMANO Y FORMACIÓN PROFESIONAL.

LÍNEA 4: TECNOLOGÍAS DIGITALES INTELIGENTES EN LA INDUSTRIA 4.0.



UNAM
POSGRADO

INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM





GOBIERNO DEL
ESTADO DE
MÉXICO

Mtra. Delfina Gómez Álvarez
Gobernadora Constitucional
del Estado de México

Mtro. Miguel Ángel
Hernández Espejel
Secretario de Educación del
Estado de México

Tecnológico de Estudios
Superiores de Ecatepec

SUBCOMITÉ EDITORIAL:

José Antonio Arcos
Casarrubias
Abel Roldán Alatraste
Verónica Martínez Martínez
Isabel de la Luz Membrillo
Venegas
José Luis Chávez Rojas
Jesús González Lemus
Esther Acevedo Arcos
Ángel Hernández Estrada
Ángel Mazza Arias
Guadalupe Regina Dorantes Díaz

Corrección de estilo
Rafael Ortiz Hernández

Diseño
Mara Brisa López Vargas

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN
SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR Y NORMAL
TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC
UNIDAD DE RELACIONES PÚBLICAS Y DIFUSIÓN



CONSEJO EDITORIAL

Dr. Juan Humberto Sossa Azuela
Dr. Alfonso Totosaus Sánchez
Dr. Martín Salazar Pereyra
Mtro. Fernando Lugo
Dr. Armando Gama Goicochea
Dr. Salvador Contreras Hernández
Mtro. Gustavo Calvillo Gandulfo
Dr. Graciano Calva Calva

COMITÉS TÉCNICOS DE ARBITRAJE

INGENIERÍA INFORMÁTICA

Mtro. Derlis Hernández Lara
Académico de la División de Ingeniería
Informática

Mtro. Emmanuel Tonatiuh Juárez
Velázquez
Académico de la División de Ingeniería
Informática

Mtro. Leonardo Moreno Villalba
Académico de la División de Ingeniería
Informática

INGENIERÍA EN GESTIÓN EMPRESARIAL

Mtra. Claudia Lozano Mora
Académico de la División de Ingeniería
en Gestión Empresarial

Mtra. Ingrid Trinidad Calderón
Académico de la División de Ingeniería
en Gestión Empresarial

Dr. Hugo Nathanael Lara Figueroa
Académico de la División de Ingeniería
en Gestión Empresarial

CONTADOR PÚBLICO

Mtra. Juana Mora López
Académico de la División de Contaduría
Pública

Mtra. Elizabeth Mercedes Garmendia
Guerrero
Académico de la División de Contaduría
Pública

INGENIERÍA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES

Dr. Abraham Jorge Jiménez Alfaro
Académico de la División de Ingeniería
en Sistemas Computacionales

INGENIERÍA MECÁNICA, MECATRÓNICA E INDUSTRIAL

Mtro. Wenceslao Cuauhtémoc Bonilla
Académico de la División de Ingeniería
Mecánica, Mecatrónica e Industrial

Dra. Belem Arce Vázquez
Académico de la División de Ingeniería
Mecánica, Mecatrónica e Industrial

INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

Dra. Mariana Bárcenas Castañeda
Académico de la División de Ingeniería
Química y Bioquímica

Dra. Isabel de la Luz Membrillo Venegas
Académico de la División de Ingeniería
Química y Bioquímica

Tecnocultura, revista de divulgación del conocimiento científico, tecnológico y humanístico del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec. Año 23, Fecha de publicación: noviembre 2025. Número de autorización del Comité Editorial de la Administración Pública Estatal CE: 205/05/10/12-01. Edita y distribuye la Unidad de Relaciones Públicas y Difusión, domicilio: Av. Tecnológico s/n, Col. Valle de Anáhuac, C.P. 55210, Ecatepec, Estado de México. Teléfono 50 00 23 14. Correo electrónico: urpd@tese.edu.mx.

Número de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Educación Pública: 04-2023-010917424300-102, ISSN: 1870-7157. Certificados de Título y de Contenido en trámite. Se autoriza la reproducción total o parcial del material publicado en Tecnocultura, siempre y cuando cite la fuente. Los artículos son responsabilidad de los autores.

Revista registrada en el Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (Latindex), No. Folio 13782.

Página oficial: <https://tese.edomex.gob.mx/>

Editorial

La Inteligencia Artificial y la Transformación Industrial: Compilación de Trabajos del Segundo Congreso Nacional de Ingeniería Industrial y de Sistemas 2025

*La ciencia de datos convierte información
en ventaja; la IA la transforma en acción.*

En la actualidad, la inteligencia artificial (IA) y la ciencia de datos están cambiando la forma en que se diseñan, operan y mejoran los sistemas productivos y organizacionales. Su impacto ya no es una promesa futura: está presente en la automatización de procesos, en el análisis predictivo, en la optimización de recursos y en la toma de decisiones estratégicas. En este contexto, la industria exige soluciones cada vez más ágiles, eficientes y competitivas, y, al mismo tiempo, demanda profesionales capaces de comprender y liderar esta transformación.

Bajo este enfoque, la revista *Tecnocultura* presenta con orgullo esta edición especial, que reúne la totalidad de los trabajos aceptados y presentados en el Segundo Congreso Nacional de Ingeniería Industrial y de Sistemas, realizado en modalidad híbrida los días 20 y 21 de marzo de 2025, y cuya sede fue el Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE). Este encuentro se consolidó como un espacio clave para dialogar sobre los retos actuales de la industria y, sobre todo, para proponer rutas concretas de innovación tecnológica con sentido académico, social y productivo.

El Congreso fue posible gracias al trabajo colaborativo entre TESE, la Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM, y el Laboratorio Nacional Conahcyt en Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos (LNC-IACD), junto con diversas instituciones participantes. El propósito central fue analizar de qué manera la IA y la ciencia de datos están transformando los procesos productivos y la gestión organizacional, identificando oportunidades reales para implementar soluciones que incrementen la productividad, fortalezcan la calidad y mejoren el desempeño integral de los sistemas industriales.

Los trabajos reunidos en este volumen reflejan el dinamismo y la diversidad del conocimiento compartido por profesionales, académicos, investigadores y estudiantes. En conjunto, los artículos aportan experiencias, metodologías y resultados que dialogan con problemas actuales: desde la mejora continua y la manufactura avanzada, hasta la adopción de tecnologías inteligentes, la evolución de sistemas industriales y el desarrollo de competencias para entornos altamente cambiantes.

El contenido de los artículos, se basa en los cuatro ejes temáticos que guiaron el Congreso:

1. Línea 1. La Administración de Operaciones ante la Industria 4.0
2. Línea 2. Sistemas de Gestión de Calidad y Manufactura
3. Línea 3. Desarrollo Humano y Formación Profesional
4. Línea 4. Tecnologías Digitales Inteligentes en la Industria 4.0

Confiamos en que esta colección se convierta en una referencia valiosa para académicos, tecnólogos, estudiantes y empresarios, al ofrecer perspectivas actuales, enfoques rigurosos y propuestas aplicables para afrontar los desafíos de la toma de decisiones en contextos inciertos. Más que un compendio de ponencias, este volumen busca ser una invitación a pensar la industria con mirada crítica, a innovar con responsabilidad y a construir, desde el conocimiento, soluciones que impacten positivamente en nuestra realidad productiva y social.

Dra. Griselda Cortés Barrera
Docente-Investigadora Responsable Técnico del Laboratorio Nacional
Conahcyt en Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos (LNC-IACD)

INFORMACIÓN PARA LOS AUTORES

La Revista **Tecnocultura** es un órgano de difusión del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE); su publicación es cuatrimestral, el objetivo principal es la divulgación del pensamiento y los avances científicos, tecnológicos y humanísticos, ya sea que se generen en las diferentes áreas académicas de la Institución o de origen externo, pero que puedan ser de interés general.

- La información podrá presentarse en forma de artículo, ensayo o reportaje, incluyendo materiales de divulgación. Los trabajos deben ser producto de investigaciones de elevado nivel académico, que contribuyan al conocimiento en la materia y ser inéditos en español. Igualmente, las ponencias o presentaciones deberán adaptarse para su edición escrita. En todos los casos, se buscará que su contenido sea ameno y novedoso.

- El lenguaje debe ser accesible a estudiantes de licenciatura, sin perjuicio de la información científica o académica contenida en el artículo. Cuando sea necesario el uso de tecnicismos, deberá explicarse su significado con la amplitud necesaria. Se recomienda la inclusión de recuadros que aclaren el significado de conceptos de difícil comprensión.

- Los artículos deben tener subtítulos o incisos; un resumen introductorio (*abstract*) en español e inglés, no mayor de diez líneas, que atraiga el interés del lector. En seguida, mencionar las palabras clave del artículo, y su respectiva versión en inglés (*keywords*). Asimismo, al final del artículo incluir una breve conclusión, y la bibliografía o fuentes consultadas.

- Para las citas y referencias bibliográficas que aparezcan en el texto, se utilizará el modelo APA (Asociación de Psicología de Estados Unidos de América), cuyas características se detallan en el documento en PDF anexo, titulado *El Manual de Publicación APA al Alcance de Todos*.

- Para fines de registro, se solicita anexar una hoja que contenga datos curriculares del autor o autores, como nombre completo, grado académico, institución de procedencia, domicilio, teléfono, y dirección electrónica.

Recomendaciones

- Revisar meticulosamente la ortografía, signos de puntuación, sintaxis, redacción, aparato crítico (notas, citas, fuentes, bibliografía, etcétera), y la estructura del trabajo.

- En la bibliografía o fuentes consultadas, deberán incluirse todos los datos para la

identificación de la fuente informativa: apellidos y nombres del(los) autor(es), año, título de la obra, número de edición, país, editorial, tomo o volumen, número de páginas totales, colección, etcétera.

- Evitar o reducir al mínimo los documentos, ilustraciones o fuentes de consulta provenientes de Internet, o en su caso, indicar claramente su origen mediante las respectivas cibergrafías. Si los cuadros, tablas dibujos, fotografías o gráficos en general son de creación propia, también deberá mencionarse al pie de éstos.

- En el caso de las citas textuales, identificar claramente dónde se abren y cierran las comillas.

- Verificar la correcta jerarquización y numeración de capítulos, subcapítulos, incisos, u otras divisiones, mismas que deberán conservar un orden lógico y constante a lo largo del texto. El resumen, introducción, palabras clave, agradecimientos, conclusiones y bibliografía o fuentes, no son numerables para el desarrollo del tema.

- Utilizar un lenguaje claro, preciso, con conceptos, siglas o signos bien explicados. Procurar el uso de sinónimos para no repetir palabras. Evitar las cacofonías (palabras con sonido semejante), solecismos (falta de sintaxis), barbarismos (uso de términos extranjeros, arcaicos y neologismos), muletillas, "queísmos", verbos fáciles (hacer, poner, decir, tener, haber, etcétera), adjetivos, frases hechas, y otros vicios del lenguaje.

- Conservar un estilo constante de redacción.

- Evitar los párrafos largos o con cadenas de ideas demasiado extensas. Es preferible utilizar párrafos cortos, de cinco a siete líneas en promedio.

- Eludir el uso excesivo de atributos tipográficos para destacar palabras, frases o párrafos (como negritas, cursivas, subrayados, mayúsculas, tipografía diferente, etcétera), si no son estrictamente necesarios.

Características de Presentación

- Se recomienda una extensión máxima de 10 cuartillas, incluyendo cuadros, notas y bibliografía. El texto deberá estar elaborado en Office Word 2003 o versiones posteriores, guardando el documento con la extensión .doc. y entregar copia del archivo digital, así como una copia impresa. Los materiales serán evaluados por el Consejo Editorial de la revista.

- El trabajo deberá presentarse en hojas

tamaño carta y por una sola cara, sin tachaduras ni guiones al final de cada línea, ni tampoco división de palabras. El cuerpo del texto deberá estar a una sola columna, con un interlineado de 1.5; la caja de texto será de 28 líneas por cuartilla en promedio y 64 caracteres por línea (es decir, 1790 caracteres por cuartilla). La página deberá poseer márgenes de 2.5 cm en cada lado.

- La tipografía deberá ser Times, Arial, o alguna otra de uso común, con un tamaño de 14 puntos para títulos y subtítulos; 11 a 12 puntos para el texto, y 9 a 10 puntos para las notas o citas.

- Al inicio de los párrafos se debe omitir la sangría, o en su caso, que tenga un máximo de tres espacios. Cada párrafo deberá separarse con un espacio (o *enter*).

- Estructurar el texto con un diseño básico, que permita identificar la conformación y ordenamiento de los elementos que integrarán el texto impreso, pero no emplear atributos automáticos (numeraciones o viñetas), especiales, etiquetas u otros recursos de diseño que no sean estrictamente necesarios.

- Si el archivo del texto es muy extenso o contiene elementos que lo hacen demasiado grande, se recomienda segmentar la obra en capítulos o secciones independientes.

- Las ilustraciones, fotografías gráficos o figuras deberán incluirse dentro del texto impreso y por separado en archivos electrónicos u originales de óptima calidad (imágenes nítidas, uniformes y sin distorsiones), en formato TIFF o JPG con una resolución de 300 ppp, y deberán tener como atributo el estar "delante del texto". Las gráficas, esquemas, figuras, cuadros y similares se deben elaborar en computadora a línea, en Word, Power Point, Corel Draw o similares, sin pantallas.

- Si se utilizan fórmulas matemáticas, signos o símbolos especiales generados con algún programa expreso, cerciorarse de que sean editables y compatibles con Office Word.

Para fines de registro, se solicita anexar una hoja que contenga datos del autor, como nombre, grado académico, institución de procedencia, domicilio, teléfono y dirección electrónica.

Atentamente
Unidad de Relaciones Públicas y
Difusión
del Tecnológico de Estudios
Superiores de Ecatepec
Teléfono: 55 5000 2314
urpd@tese.edu.mx

C

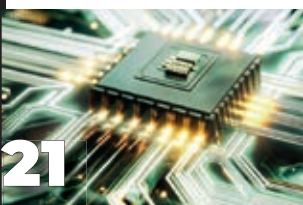
ontenido



9

Diseño Mecánico del Proceso de Reciclaje de Placas de Baterías de Plomo-Ácido

Narlys Marrugo Jimenez
Alejandro Boleaga Vazquez
Maribel Angélica Mendoza Núñez
Yaisa Marrugo Jiménez



21

Laboratorio remoto basado en tecnología reconfigurable FPGA mediante Sistemas en Chip usando IoT

Víctor H García Ortega
Nicolás Kemper Valverde
Josefina Bárcenas López
Enrique Ruiz-Velasco Sánchez



29

Digitalización de las Cartas de Crédito Mediante DLT para Agilizar su Emisión y Ejecución

Isaías Cerqueda García



45

Identificación de Amenazas Zero-Day en Entornos Empresariales con Modelos de Aprendizaje Profundo

Ana Laura Bárcenas Medina
Alan Jair Alcaraz Cancio



57

Modelo de Distribución de Costos para el Agua Potable en Fraccionamientos Habitacionales Mediante Juegos Cooperativos

Guillermo López López
Miguel Cedeño Hernández



66

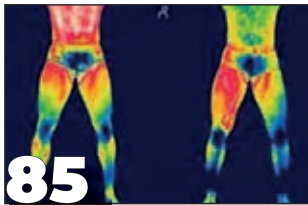
Impacto del Embalaje del Transporte de Carga, en el Consumo Energético y Cambio Climático

Enrique de Jesús Mohedano Torres
Lesly Anahí Barrera Pacheco
Yanet Hernández Ortega
Elizabeth Barrera Rodriguez



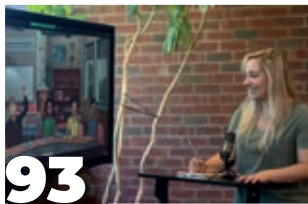
Importancia de la Innovación Centrada en el Usuario: Extractor de Aguamiel

Blas Yáñez Sandra
Padilla García Erick Axel



Monitoreo de Fatiga Muscular en Tiempo Real Utilizando Señales Electromiográficas Sintéticas del Músculo Gastrocnemio

Felicitas López Vargas
José Alfredo Jiménez Meza
Rafael Salas Zárate
María del Carmen González Vásquez



Simulador Virtual para la Enseñanza-Aprendizaje de los Medios Alternos de Solución de Conflictos (MASC) en México

Mario Octavio Carrasco Delgado



Diseño de un Modelo Predictivo con Inteligencia Artificial y Sistemas de Información Geográfica para la Gestión de Incendios Forestales

Samuel Efrén Viñas Álvarez
Claudia Teresa González Ramírez
Gabriel Mora Patiño
José Luis Martínez Alcántar



Integración de las Tecnologías Geoespaciales en Programas de Ingeniería

Laura Mercedes Arteaga Rojas
Sergio Gonzalez Gil
Griselda Cortés Barrera



Diseño CAD e Instrumentación de un Robot Tipo Balancín con un Enfoque de Innovación Frugal

Erick Axel Padilla-García
Raúl Dalí Cruz-Morales
Jaime González-Sierra
David Tinoco-Varela



Implementación y Evaluación de Soluciones Bancarias Locales en WebLogic: Consulta de Saldos y Listener para Eventos SPEI

Alan Evani Ramírez Hernández



¿Cómo Documentar la Memoria Histórica del Amazonas desde la Ingeniería?

Carlos Alejandro Gómez Albarracín
Albert Stiben Torres Merchán
Andrés Leonardo Durán Vivas
Andrea Constanza Tijero Díaz
Juan José Ardila Garzón
María Antonia Alfonzo Mujica
Diana Herrera Moyano



Modelo Predictivo para la Gestión de Incendios Forestales en Michoacán con Redes Neuronales

José Luis Martínez Alcántar
Jhacer Kharen Ruiz Garduño
Gabriel Mora Patiño
Samuel Efrén Viñas Álvarez



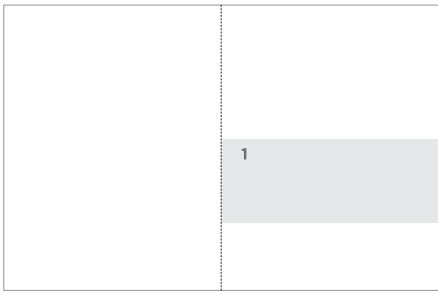
Navegando Historias: Memoria Amazónica y Narrativas Transmedia desde la Armada y la Academia

Lukas Santiago Chinome Pérez
Daniel Fernando Fiquitiva Pizza
Andrés Leonardo Duras Vivas
Diana Herrera Moyano
María Antonia Alfonzo Mujica



La Calidad Objetiva del Queso Oaxaca para la Revalorización de la Producción Artesanal

Cristina Salas Vargas
Randy Alexis Jiménez Jiménez
Mauricio Miguel Estrada
Valentín Efrén Espinosa Ortiz



<https://jiantaimachine.com/es/recicladora-de-baterias-de-plomo-soluciones-industriales/>

Diseño Mecánico del Proceso de Reciclaje de Placas de Baterías de Plomo-Ácido

Narlys Marrugo Jimenez¹, Alejandro Boleaga Vazquez²,
Maribel Angélica Mendoza Núñez³,
Yaisa Marrugo Jiménez⁴



Palabras clave: Nos gustaría animarle a que incluya sus palabras clave en esta sección.

Acerca de los autores

^{1,2}Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME Zacatenco, CDMX, ³Instituto Politécnico Nacional, ESIME Culhuacán, CDMX, ⁴Instituto Politécnico Nacional, UPIICSA, CDMX.

Introducción

El reciclaje de baterías plomo ácido ha cobrado especial relevancia a nivel mundial en la última década debido a la capacidad de este proceso para reducir el impacto ambiental de los residuos peligrosos generados por dichos equipos al final de su vida útil y disminuir

la sobreexplotación de recursos no renovables, como el plomo, mediante procesos de recuperación convencionales de materiales. Según datos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2023), la exposición prolongada al plomo afecta el sistema nervioso central, el desarrollo infantil y puede provocar efectos renales.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2024) en 2021 la exposición al plomo causó más de 1,5 millones de muertes en todo el mundo, principalmente causadas por sus efectos cardiovasculares. Además, según el Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME, 2021) en ese año ocasionó la pérdida de más de 33 millones de años de vida ajustados por discapacidad. Por otra parte, en 2017 la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017) afirma que las baterías plomo ácido representan aproximadamente el 85% del consumo total de plomo a nivel global, del cual una gran proporción se encuentra destinado a aplicaciones industriales y automotrices.

La contaminación por plomo en el aire y los suelos es un problema en estados como la Ciudad de México, el Estado de México y Nuevo León, donde las concentraciones superan los límites legales establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021 para suelos contaminados, y por la NOM-026-SSA1-2021 para plomo en aire ambiente. Esta situación representa una amenaza directa a la salud pública, especialmente para la población infantil, y requiere medidas urgentes de mitigación.

Además, la Norma Oficial Mexicana NOM-047-SSA1-2011 establece que los niveles en sangre de plomo permitidos para una persona ocupacionalmente expuesta (POE) es de 30 Qg/100 ml, y de 10 Qg/dl en caso de mujeres embarazadas. Sin embargo, diversos estudios muestran que trabajadores mexicanos en plantas recicladoras presentan concentraciones por encima de estos valores, debido a la falta de medidas adecuadas de protección (González-Luna, 2022).

De acuerdo con datos de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) “incluso pequeñas dosis acumuladas de plomo en el cuerpo pueden resultar en intoxicaciones a largo plazo, especialmente en regiones donde la laxitud en la regulación medioambiental permite que empresas extranjeras trasladen baterías usadas hacia el país”(Smith N. A., 2017).

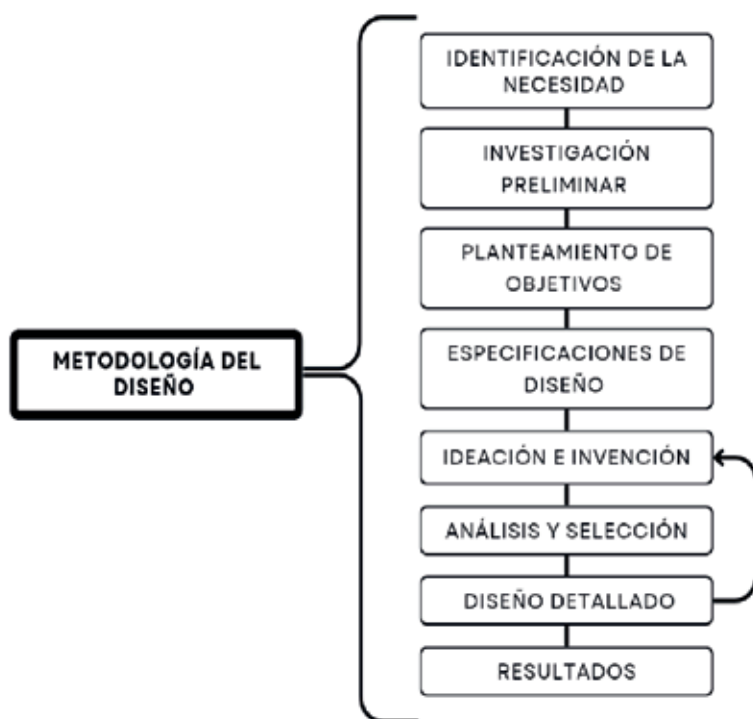
En cuanto al manejo de residuos peligrosos, la NOM-052-SEMARNAT-2005 clasifica las baterías usadas como residuos peligrosos debido a su contenido de plomo (carácter tóxico) y ácido sulfúrico (carácter corrosivo). Además, la NOM-018-STPS-2015 exige la implementación del Sistema Globalmente Armonizado (SGA) de comunicación de riesgos químicos, mediante el uso de etiquetas, pictogramas, hojas de datos de seguridad y señalización en el sitio de trabajo. Estas disposiciones permiten identificar y controlar los peligros derivados del uso de sustancias químicas peligrosas en el proceso.

En contraposición a la pirometalurgia, la hidrometalurgia emerge como una alternativa sostenible que permite la recuperación de materiales valiosos en condiciones eco amigables y sustentables. Este proceso emplea disolventes acuosos y agentes lixiviantes, como el citrato de sodio, para extraer los metales, eliminando la necesidad de altas temperaturas y sus consecuentes emisiones. En México esta tecnología aún no se aplica a nivel industrial debido a barreras tecnológicas y económicas, pero representa una solución prometedora para minimizar los impactos negativos asociados al reciclaje tradicional.

En este contexto, el diseño de un reactor de lixiviación de plomo contribuye a mejorar las condiciones laborales de los trabajadores en este sector y reducir el impacto ambiental de estas actividades. Asimismo, esta propuesta responde al derecho constitucional a un medio ambiente sano y a la protección de la salud, conforme al artículo 4º de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y al principio 1 de la Declaración de Estocolmo (PNUMA, 1972).

La presente propuesta tiene como objetivo plantear el diseño preliminar y la validación mediante simulación computacional de un reactor hidrometalúrgico por agitación que permita la recuperación del plomo a partir de las placas de las baterías industriales plomo ácido, combinando elementos de diseño mecánico basado en normativas internacionales (ASME y API) con simulaciones estructurales y dinámicas que permitan evaluar la eficiencia y seguridad del sistema, buscando contribuir a la transición hacia prácticas industriales sostenibles, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible emitidos por las Organización de las Naciones Unidas en su Agenda 2030 que reflejan las demandas ambientales y de salud pública actuales.

Este esfuerzo no solo responde a la necesidad de avanzar en la gestión responsable de residuos peligrosos, sino que abre una ventana de oportunidad para fomentar la innovación tecnológica en el país y posicionarlo como un líder en el reciclaje sostenible de materiales.



Fuente: Elaboración propia 2024. Datos obtenidos de Norton, R. L. (2009). *Diseño de maquinaria: síntesis y análisis de máquinas y mecanismos* (4a ed.). McGrawHill.

Figura 1

Metodología del Diseño.

1. Metodología

El diseño del reactor se basó en un enfoque integral que combina principios de ingeniería mecánica, normativas internacionales y simulaciones computacionales para garantizar su viabilidad técnica. La metodología utilizada fue una adaptación de la metodología de R. Norton, la cual presenta fases detalladas que permiten establecer objetivos claros y medibles a lo largo del proceso de diseño, como se muestra en la figura 1.

1.1 Identificación de la necesidad

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2024) ha clasificado el plomo entre las diez sustancias químicas más peligrosas para la salud pública que requieren la intervención de los Estados Miembros para proteger la salud de los trabajadores, los niños y las mujeres en edad reproductiva.

Estas preocupaciones llevaron a priorizar un diseño basado en la hidrometalurgia, un enfoque más limpio y eficiente. Para asegurar que las características y requisitos del cliente se traduzcan eficazmente en especificaciones de diseño y procesos, se utilizó el Despliegue de la Función de Calidad (QFD) que por medio de una puntuación se llegó a la conclusión de priorizar la capacidad de procesamiento y un diseño con materiales nacionales.

1.2 Investigación preliminar

Se llevó a cabo una búsqueda de literatura científica, técnica y normativa, además se realizaron entrevistas a expertos para fundamentar los criterios de diseño del reactor, considerando:

- Estudios recientes sobre procesos de lixiviación de plomo
- Efectos toxicológicos en trabajadores expuestos y poblaciones vulnerables.
- Entrevistas no estructuradas con la Dra. Gretchen Terri Lapidus Lavine de la UAM Iztapalapa.
- Búsqueda de legislación de normativas mexicanas aplicables.
- Visitas a plantas de reciclaje de baterías plomo ácido.

1.3 Planteamiento de objetivos

Desde la identificación de necesidades, se analizó la problemática ambiental y de seguridad en el reciclaje de plomo en México, estableciendo objetivos específicos orientados al diseño de un reactor que cumpla con los requerimientos, así como la optimización del proceso de lixiviación y la reducción del impacto ambiental. Este proceso involucró la construcción de gemelos digitales para predecir el comportamiento del reactor en distintas condiciones operativas y la fabricación de un modelo físico a escala 1:1.43, facilitando pruebas experimentales y ajustes en el diseño.

1.4 Especificaciones de diseño

El diseño del reactor hidrometalúrgico se desarrolló combinando principios fundamentales de ingeniería mecánica, apoyados por herramientas computacionales (CAD Y CAE), para garantizar eficiencia operativa, sostenibilidad ambiental y seguridad laboral en el entorno industrial.

Se utilizó el modelo de caja negra y caja transparente: la caja negra aborda las entradas y salidas del sistema (por ejemplo, placas de baterías y citrato de sodio), mientras que la caja transparente detalla interacciones internas como la agitación y control de temperatura.

El diseño contempla normativas como ASME Sección VIII División 1 (recipientes a presión), API 650 (tanques de almacenamiento en ambientes corrosivos) y AWS D1.1 (calidad en soldaduras), asegurando la integridad estructural del reactor.

1.5 Ideación e Invención

Los parámetros operativos son: capacidad de 500 litros, velocidad de agitación de 400 rpm, y temperatura controlada. El citrato de sodio fue seleccionado como agente lixivante por su baja toxicidad y alta eficiencia en la extracción de plomo en condiciones de pH controlado (Zárate-Gutiérrez & Lapidus-Lavine, 2014; Villa Vargas, 2017).

La agitación, clave para la eficiencia del proceso de lixiviación, se seleccionó un impulsor de flujo axial con aspas inclinadas y deflectores verticales para evitar vórtices y mejorar la circulación (Paul et al., 2004; McCabe *et al.*, 2007). El proceso de diseño fue iterativo, permitiendo ajustes en componentes clave como materiales, eje de agitación, pintura, entre otros.

1.6 Análisis y selección

En esta etapa se analizaron las diferentes alternativas de solución por medio de herramientas como la matriz morfológica y el cuadro de decisión. Con base en ello, se eligió el boceto que satisface las necesidades contemplando puntos importantes como resistencia de los materiales, su disponibilidad en el mercado y tiempo de manufactura.

TABLA 1.
TABLA COMPARATIVA DE BOCETOS

Características	Boceto 1	Boceto 2	Boceto 3	Boceto 4
Forma del reactor	Cilindro con una sola tina	Cilindro el primero y cuadrado el segundo	Cilindro con dos tinas	Cilindro con una sola tina
Sujeción de placas	Estructura circular con separadores	Estructura circular con separadores	Armadura de vigas y ganchos	-----
Tanque dieléctrico	Tanque con camisa aislante	Tanque fabricado con materiales dieléctricos (plástico)	Tanque fabricado con materiales dieléctricos (plástico)	Tanque con camisa aislante
Sistema de agitación	Motor con agitador	Inyectores	Motor con agitador	Motor con agitador
Proceso de electrolisis	Interno	En un segundo recipiente	Interior, junto con el sistema de filtrado	Interno
Sistema de filtrado	Rejillas	Rejillas	Orificio en la primera tina	Orificio en la parte inferior del tanque
Caja reductora	Engranajes	-----	Banda	Control electrónico

1.7 Diseño detallado

Una vez seleccionado el boceto, se creó un conjunto completo de dibujos de ensamble en CAD, por cada pieza utilizada como se muestra en la Figura 2. El software SolidWorks permitió crear y simular condiciones operativas, evaluando esfuerzos estáticos y dinámicos, resistencia de materiales y dimensiones críticas del reactor.

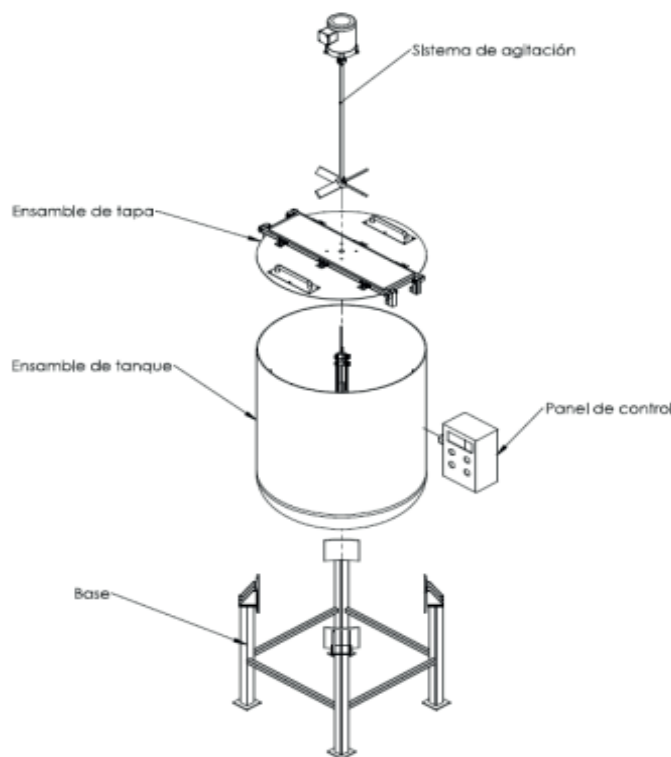


Figura 2

Modelo 3D del reactor de lixiviación.

Fuente: Elaboración propia.

2. Resultados

Los resultados obtenidos son respaldados por el Método de Elemento Finito (MEF), cálculos operativos, análisis de parámetros estructurales y dinámicos y observaciones del funcionamiento del modelo a escala.

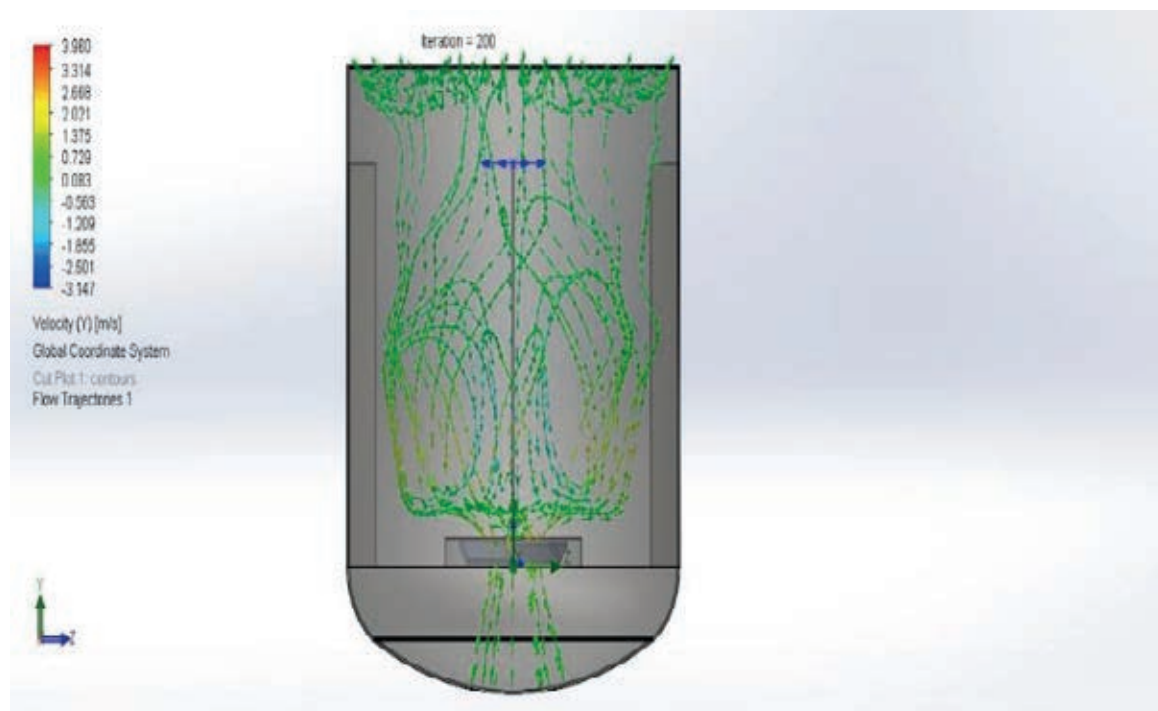
2.1 Diseño estructural del reactor

Los análisis de simulación estática y dinámica mostraron que el diseño es estructuralmente robusto y presenta un factor de seguridad adecuado bajo diferentes escenarios operativos. Las principales características incluyen:

- Materiales seleccionados: Acero ASTM-A36 con recubrimiento epóxico, adecuado para el contacto continuo con soluciones químicas.

- Sistema de agitación: Configuración de flujo axial con impulsores inclinados a 45° impulsados por un motor de 1.5 Hp, que garantizan una mezcla homogénea de los sólidos en suspensión y el agente lixivante. La prevención de vórtices se logró mediante la inclusión de deflectores verticales.

La Figura 3 (análisis dinámico) muestra la trayectoria del fluido dentro del depósito cuando el agitador opera a 400 rpm y alcanza su máxima capacidad de llenado. El análisis considera una viscosidad de la mezcla de 7 Pa·s y una velocidad de rotación del agitador de 400 rpm. La visualización, codificada por colores según la magnitud de la velocidad, revela un incremento radial de esta, lo que provoca que el flujo dentro del tanque adopte una dirección predominantemente tangencial.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3

Contornos de la magnitud de la velocidad del fluido y trayectoria del movimiento de este.

2.2 Parámetros operativos

El sistema propuesto opera con citrato de sodio como agente lixivante. Las pruebas acerca de la recuperación de este metal (plomo) en conjunto con el agente se muestra en la tabla I. Asimismo, estudios realizados por Villa Vargas (Villa Vargas et al., 2017) respaldan el uso de este agente, destacando que su impacto ambiental es menor en comparación con ácidos minerales más agresivos. Durante las pruebas simuladas, se observaron que la operación a 400 rpm demostró ser suficiente para mantener los sólidos en suspensión y optimizar el contacto entre el plomo y el agente lixivante, como lo señala (McCabe et al., 2007) en sus principios de diseño de tanques agitados.

TABLA II.
PRUEBAS DE ELECTRODEPOSICIÓN

Distancia entre ánodo y cátodo	Amperaje/m ²	Voltaje	Gramos de plomo obtenido
Disolución 60% (5.6 gramos de lodo/Litro)			
5 cm	300	2.43	0.1940
3.2 cm	150	2.49	0.168
Disolución 80% (2.8 gramos de lodo/Litro)			
5 cm	300	2.51	0.127
3.2 cm	150	2.48	0.117

2.3 Observaciones recogidas de las pruebas realizadas en el modelo a escala

No obstante, los resultados de las pruebas de simulación fueron satisfactorias, el modelo a escala presentó vibraciones en el eje del agitador producidas por la relación de esbeltez lo que disminuiría notablemente la vida útil de los componentes del equipo. El análisis de esta observación deberá ser desarrollado en fases posteriores de esta investigación.



Figura 4

Prototipo del reactor.

Fuente: Elaboración propia

2.4 Limitaciones y áreas de mejora

Aunque el diseño es funcional, las simulaciones y observaciones revelaron aspectos a mejorar para garantizar la implementación efectiva del reactor a nivel industrial:

- Se identificaron puntos críticos de desgaste en el eje, lo que podría mitigarse mediante el rediseño del sistema de agitación, considerándose una opción viable la agitación por vibración.
- El tanque ha sido diseñado con una expectativa de vida de veinticinco años, sin embargo, se sugiere establecer un programa regular de mantenimiento para garantizar el óptimo funcionamiento del reactor a lo largo del tiempo. Esto incluiría inspecciones periódicas, limpieza de componentes y reparaciones según sea necesario.
- Se propone ampliar el diseño e incluir el proceso de triturado previo a la lixiviación, con el objetivo aumentar la superficie de contacto entre el material y el agente lixivante mejorando la eficiencia del proceso y minimizando la exposición del personal al contacto directo con la materia prima.
- Es necesario desarrollar sistemas ergonómicos y seguros para la carga y descarga de las placas de batería, minimizando la exposición de los trabajadores.
- Se debe integrar un sistema para la neutralización y disposición segura de los residuos líquidos generados durante el proceso de lixiviación, asegurando el cumplimiento de las normativas ambientales.
- Para que el proyecto pueda ser comercializado, se deberá realizar un estudio detallado de las normas de seguridad y salud de los trabajadores para reducir riesgos físicos aplicadas a la operación del equipo.

Conclusiones

A continuación, se detallan las principales conclusiones derivadas del presente trabajo:

- El uso de citrato de sodio como agente lixivante demostró ser una opción viable y sostenible, alcanzando eficiencias de recuperación de plomo superiores al 90%. Este resultado, respaldado por estudios previos, reafirma que la hidrometalurgia es una alternativa sólida frente a los métodos pirometalúrgicos tradicionales, reduciendo emisiones tóxicas y minimizando los riesgos asociados a la manipulación de materiales peligrosos.
- Las pruebas estáticas y dinámicas realizadas sobre el diseño del reactor confirmaron su capacidad para operar de manera segura bajo condiciones industriales exigentes. La implementación de un sistema de agitación con impulsores de flujo axial y deflectores verticales aseguró una mezcla homogénea, optimizando el contacto entre el agente lixivante y las placas de baterías.

Referencias

ASME. (2021). SECTION VIII Rules for Construction of Pressure Vessels ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code. www.asme.org/cer

González-Luna, R., Díaz-Ramírez, J., & Pérez-García, A. (2022). Exposición ocupacional al plomo en trabajadores de recicladoras de baterías en México. *Revista Mexicana de Salud Pública*, 64(2), 112-120.

IHME. (2021). Lead exposure - Level 3 risk | Institute for Health Metrics and Evaluation. <https://www.healthdata.org/research-analysis/diseases-injuries-risks/factsheets/2021-lead-exposure-level-3-risk>

INECC. (2023). Diagnóstico ambiental por contaminación de plomo en zonas urbanas e industriales de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. <https://www.gob.mx/inecc>

Martínez Arroyo A., Ruiz Suárez LG., Gavilán García A., Domínguez Taylor P., & Murillo Juárez C. (2021). Estudio Reducción Exposición Plomo México INECC.

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (7th ed.). McGrawHill. www.FreeLibros.org

OMS. (2017). *Reciclaje de baterías de plomo usadas. Consideraciones al sector sanitario*.

OMS. (2024, Septiembre 27). Intoxicación por plomo. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>

Organización Mundial de la Salud. (2017). Reciclaje de baterías de plomo ácido usadas: consideraciones sanitarias. Organización Mundial de la Salud.

Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., & Kresta, S. M. (2004). *Handbook of Industrial Mixing Science and Practice*. www.copyright.com.

PNUMA. (1972). *Declaración de Estocolmo sobre el Medio Ambiente Humano*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2005). NOM-052-SEMARNAT-2005: *Clasificación de residuos peligrosos por sus características*. *Diario Oficial de la Federación*.

Secretaría de Salud. (2011). NOM-047-SSA1-2011: Vigilancia de la salud de los trabajadores expuestos a plomo. *Diario Oficial de la Federación*.

- El diseño propuesto reduce significativamente el impacto ambiental del reciclaje de baterías al reemplazar procesos pirometalúrgicos intensivos en energía y emisiones con un enfoque hidrometalúrgico más limpio. Esto no solo contribuye a mitigar la contaminación atmosférica, sino que también disminuye la exposición de los trabajadores a sustancias tóxicas, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU.
- Adicionalmente, podemos afirmar que el diseño del reactor hidrometalúrgico constituye un hito en la transición hacia tecnologías más limpias y sostenibles para el reciclaje de baterías plomo-ácido. A futuro, la implementación de este diseño a escala industrial dependerá de la resolución de los desafíos identificados y de la colaboración entre instituciones académicas, la industria y el gobierno para garantizar su éxito y sostenibilidad.

Secretaría de Salud. (2021). NOM-025-SSA1-2021: Condiciones sanitarias del suelo. *Diario Oficial de la Federación*.

Secretaría de Salud. (2021). NOM-026-SSA1-2021: Valores límite permisibles de concentración de plomo en el aire ambiente. *Diario Oficial de la Federación*.

Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS). (2015). NOM-018-STPS-2015: Sistema armonizado de identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo. *Diario Oficial de la Federación*.

Smith N. A. (2017). Aparatos y Equipos Electrónicos. En *Enciclopedia de la Salud y Seguridad en el Trabajo*. Organización Internacional del Trabajo.

Villa Vargas, L. C. (2017). *Análisis comparativo de agentes lixiviantes orgánicos para el reciclaje de plomo a partir de baterías de automóvil*.

Villa Vargas, L. C., Saldarriaga Agudelo, W., & Rojas, N. R. (2017). Estudio termodinámico de lixiviación de plomo reciclado con citrato de sodio. Universidad Nacional de Colombia.

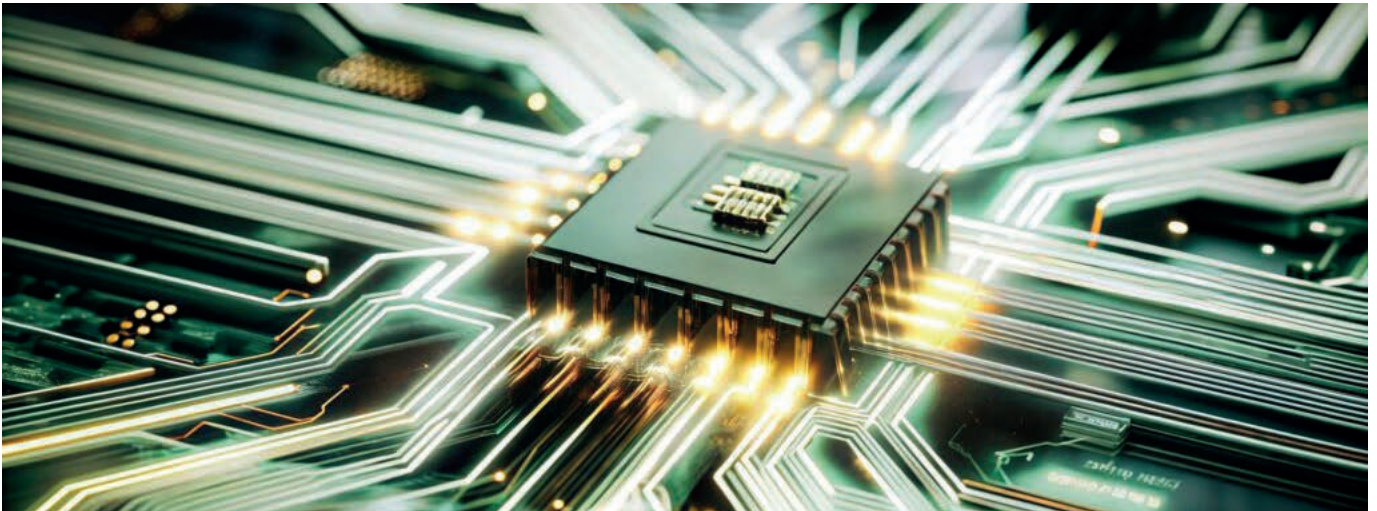
Welded Tanks for Oil Storage API Standard 650 (12a ed.). (2013). American Petroleum Institute.

Fotografías

<https://jiantaimachine.com/es/recicladora-de-baterias-de-plomo-soluciones-industriales/Owp4DDzMaXdzBsyM4QbRH6RM2hyIAbp6d>

Laboratorio Remoto Basado en Tecnología Reconfigurable FPGA Mediante Sistemas en Chip Usando IoT

Víctor H García Ortega^{1,3}, Nicolás Kemper Valverde¹,
Josefina Bárcenas López¹, Enrique Ruiz-Velasco Sánchez²



Resumen

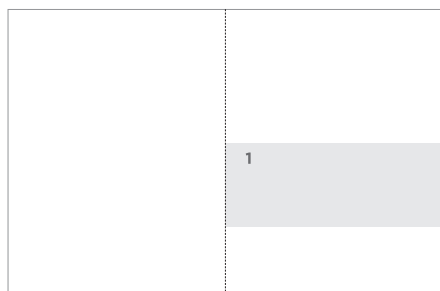
Acerca de los autores

¹ Académico del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM.

² Académico del Instituto de Investigaciones sobre la Universidad y la Educación de la UNAM.

³ Académico del Escuela Superior de Cómputo del Instituto Politécnico Nacional.

Este artículo presenta una arquitectura de laboratorio remoto para cursos de Diseño Lógico Digital usando dispositivos FPGA's mediante el entorno tecnológico de IoT con sistemas embebidos donde se aplica la metodología en V. Se aplicó una modificación del Modelo de Aceptación de Tecnología para evaluar el grado de aceptación de los estudiantes mediante una encuesta con 21 ítems pre-codificados usando la escala de Likert, la cual se aplicó a 28 participantes. El Coeficiente Alfa de Cronbach es de 0.86, lo cual



<https://www.pc-europe.it/es6-tipos-de-dispositivos-semiconductores-y-sus-aplicaciones>

indica confiabilidad en el instrumento de evaluación diseñado. La encuesta aplicada obtuvo un porcentaje conjunto de las escalas totalmente de acuerdo y de acuerdo, entre 67.8% y el 100% en cada variable pudiendo concluir que el laboratorio remoto es ampliamente aceptado por los estudiantes. La arquitectura propuesta permite evolucionar los procesos de enseñanza y aprendizaje en distintos cursos de diferentes niveles educativos hacia la educación 4.0 mediante el uso de tecnologías emergentes de bajo costo con gran eficiencia.

Palabras clave: Educación 4.0, laboratorio remoto, FPGA, sistemas embebidos, metodología en V.

Abstract

This paper presents a remote laboratory architecture for Digital Logic Design courses using FPGA devices through the IoT technological environment with embedded systems, where the V-model methodology is applied. A modification of the Technology Acceptance Model was applied to assess the degree of student acceptance through a survey with 21 pre-coded items using the Likert scale, which was administered to 28 participants. The Cronbach's Alpha coefficient is 0.86, indicating reliability in the designed evaluation instrument. The survey results obtained a combined percentage of "strongly agree" and "agree" responses ranging from 67.8% to 100% in each variable, allowing the conclusion that the remote laboratory is widely accepted by students. The proposed architecture enables the evolution of teaching and learning processes in various courses at different educational levels towards Education 4.0 through the use of emerging low-cost and highly efficient technologies.

Keywords: Education 4.0, remote laboratory, FPGA device, embedded systems, V-model methodology.

Introducción

La cuarta revolución industrial o industria 4.0 (I4.0), es un término acuñado en Alemania en la feria de Hannover de 2011 para describir cómo esta revolucionará la organización de las cadenas de valor globales. La I4.0 comenzó a principios del siglo XXI y se basa en diversas tecnologías como el Internet de las cosas (IoT – Internet of Things), cómputo ubicuo y móvil, redes de sensores, ciencia de datos e inteligencia artificial para el aprendizaje máquina. Todos estos campos del conocimiento permiten generar avances tecnológicos innovadores y por ende una revolución tecnológica que cambia de manera fundamental la forma de vivir, trabajar y relacionarnos unos con otros (Schwab, 2016). La Educación 4.0 (E4.0) surge como resultado de la I4.0 y diversos investigadores han dado varias definiciones de ella (Mukul y Büyüközkan, 2023).

La E4.0 la podemos definir como un modelo educativo que utiliza teorías, perspectivas y estrategias de aprendizaje con diferentes enfoques educativos usando áreas tecnológicas emergentes y distintas tecnologías digitales; todo esto, para mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje. Algunas teorías identificadas son el constructivismo (Trilla y García, 2001) y el conectivismo (Downes, 2022; Siemens, 2004).

Dentro de la E4.0 surgen los Laboratorios Remotos (LR) como ambientes tecnológicos disruptivos para la realización de prácticas a distancia

que permiten consolidar el conocimiento y aprendizaje del contenido teórico visto en las aulas. La infraestructura de los LR's permite generar el entorno tecnológico denominado Internet de las cosas (IoT) (Kumar, 2019; Milenkovic, 2020). Este entorno tecnológico permite que los objetos cotidianos estén conectados a internet y sean capaces de recibir, generar y enviar información sin la intervención de humanos. Las aplicaciones de IoT son desarrolladas mediante sistemas embebidos, los cuales son sistemas computacionales diseñados con hardware y software dedicado, mediante tecnologías digitales, para desempeñar tareas específicas logrando así obtener beneficios en desempeño, costo y usabilidad del sistema. Es en este tipo de ambientes tecnológicos donde el conectivismo se hace presente con las distintas actividades de enseñanza y aprendizaje que se realizan.

Con los LR se pueden proponer modelos tecnológicos innovadores que resuelvan diversas problemáticas ligadas a la educación, las cuales se mencionan a continuación:

1. No es posible hacer uso de los laboratorios presenciales ante la suspensión de actividades académicas derivadas de eventualidades como la emergencia sanitaria ocasionada por la pandemia por COVID-19. Además, el mantenimiento de los laboratorios, paros laborales o estudiantiles, entre otras, impiden el uso de laboratorios presenciales.
2. Cuando existen actividades académicas el tiempo de uso de los laboratorios presenciales es muy limitado, siendo de tan solo una clase a la semana por cada curso teórico-práctico.
3. Dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas (2018), el ODS 4 establece, que busca "Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos". Los LR's son una opción para garantizar las oportunidades de aprendizaje de los estudiantes.
4. La brecha digital es la desigualdad que existe en el acceso, habilidades y uso de la TICs entre individuos, organizaciones, regiones y países (Van Dijk y Jan, 2020). Esta brecha puede reducirse mediante el uso de LR's al permitir que los recursos tecnológicos de los laboratorios estén disponibles, accesibles y usables a los estudiantes desde cualquier lugar.

Los LR's se han desarrollado para diversas áreas como control (Chevalier *et al.*, 2016) y la enseñanza de la programación (Ariza y Gil, 2022). Otra área importante de desarrollo de los LR's es el Diseño Lógico Digital donde se utilizan dispositivos de Arreglos de Compuertas de Campos Programables (FPGA - Field Programmable Gate Array) para la implementación de aplicaciones (Navas *et al.*, 2023; Fujieda y Okuchi, 2023; Melosik *et al.*, 2022).

En este artículo se presenta el desarrollo de un modelo tecnológico mediante un LR usando tecnología reconfigurable del tipo FPGAs para cursos de Diseño Lógico Digital. El modelo tecnológico es implementado mediante sistemas embebidos usando el entorno tecnológico de IoT para ofrecer una propuesta de solución a diversas problemáticas en el campo educativo.

1 Desarrollo

1.1 Arquitectura del Laboratorio Remoto

El LR es implementado usando sistemas embebidos con tecnología de Sistemas en Chip (SoC - System on Chip) basados en el sistema operativo Linux. Este tipo de ambientes tecnológicos se diseñan de forma personalizada

dependiendo del área donde se quiere implementar. La arquitectura general de un LR es mostrada en la figura 1 y se muestran los componentes principales, los cuales son: área de aplicación; elemento físico; sensores y actuadores; interfaz de manipulación y/o control; y sistema embebido. Primeramente, se debe elegir el área en la que se quiere implementar el LR, ya que son muy diversas y en cada una de ellas se manejan distintos elementos físicos que son específicos de cada laboratorio. Así mismo, cada elemento físico requiere de ciertos sensores y/o actuadores para su manipulación e interacción de forma remota a través de una interfaz de control.

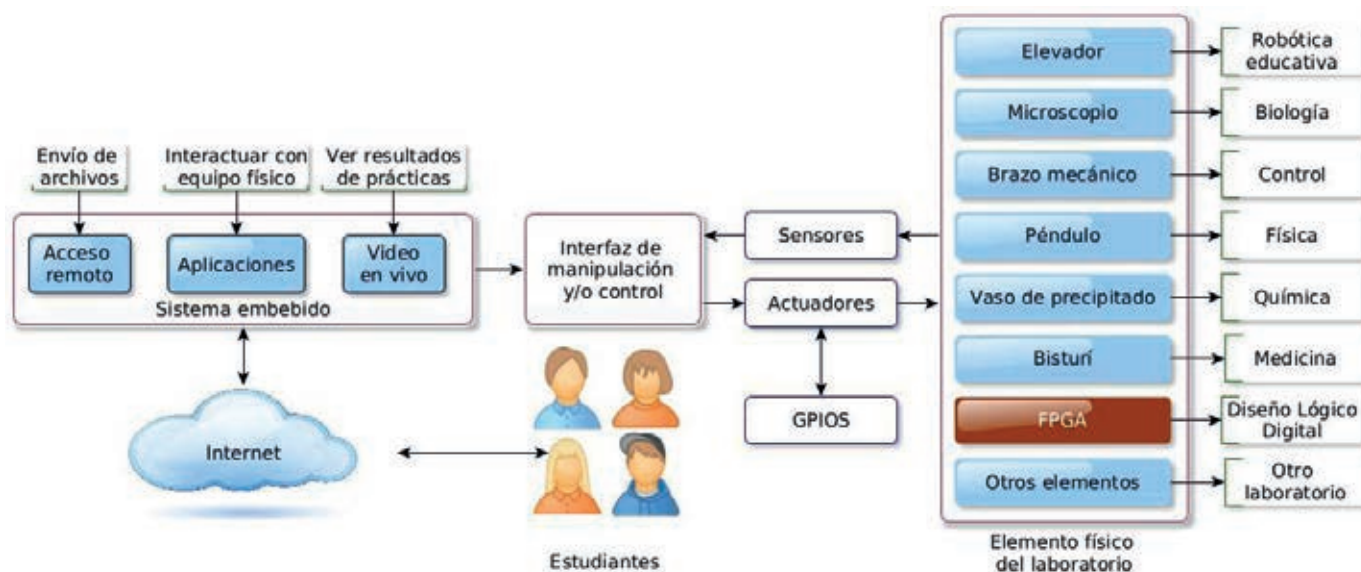


Figura 1

Arquitectura general de un laboratorio remoto.

El LR presentado en este artículo está enfocado al área de Diseño Lógico Digital mediante una tarjeta de desarrollo Nexys 4 (Digilent, 2025). Para la implementación del LR se seleccionó un SoC Raspberry Pi 4 Modelo B con 1GB en RAM, el cual usa un procesador ARM A72 de cuatro núcleos de 64 bits (RaspberryPi, 2024). El sistema operativo usado es el RaspberryPi OS Lite de 64 bits, el cual tiene un tamaño de imagen de 438 MB. Además, se utiliza una cámara Módulo 2 para Raspberry Pi de 8-Megapíxeles. También el LR utiliza una interfaz de manipulación que conecta los GPIOs del SoC con la tarjeta de desarrollo Nexys 4 creando un conector al que llamamos LAB REMOTO, el cual permite manejar hasta 24 *switches* virtuales.

En el SoC se desarrollaron las aplicaciones que permiten realizar el acceso remoto al sistema, la programación del FPGA, la manipulación de los *switches* virtuales para la interacción de las prácticas y la visualización de los resultados con el video en vivo.

1.2 Metodología para sistemas embebidos

Para la implementación de la aplicación en el sistema embebido, se usó una adaptación de la metodología del modelo en V, propuesta por Coop (2006)

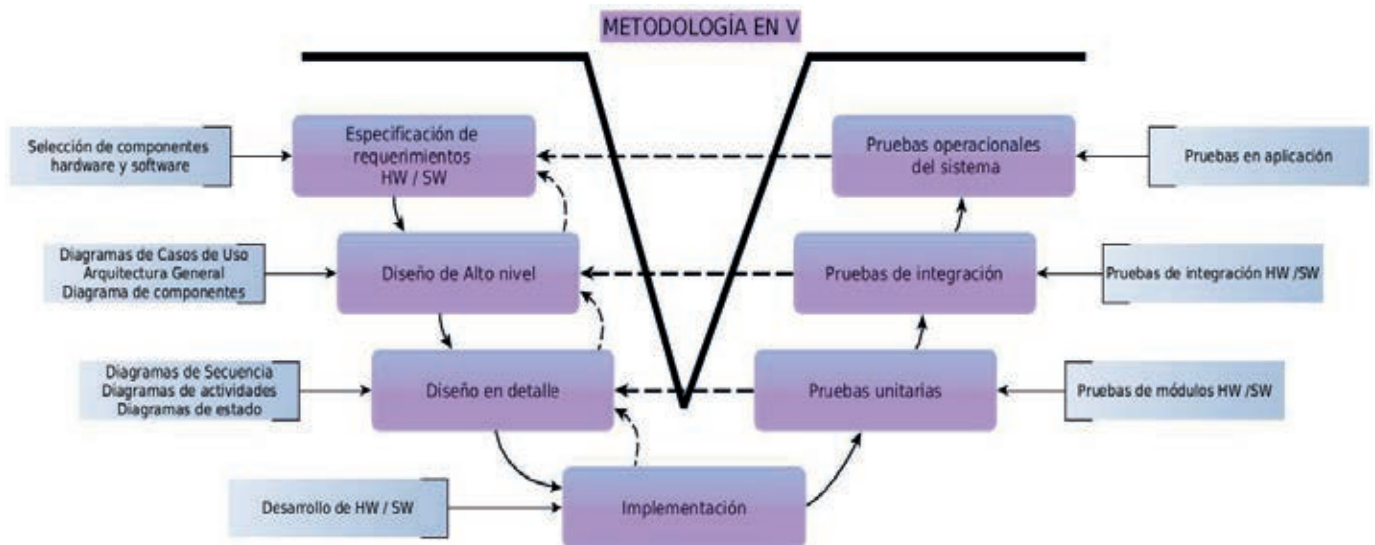


Figura 2

Metodología en V para Sistemas Embebidos.

para el desarrollo de sistemas embebidos basados en SoC. Esta metodología se muestra en la Figura 2. Las etapas de la metodología en V comprenden desde la especificación de requerimientos hasta las pruebas operacionales del sistema.

Ésta permite regresar a las etapas anteriores para realizar los ajustes necesarios y cumplir con los requerimientos establecidos. Además, permite utilizar el Lenguaje Unificado de Modelado (UML – Unified Modeling Language) para cada una de las etapas (Booch *et al.*, 1999) lo que permite hacer una descripción detallada de ellas y un diseño estandarizado.

1.3 Secuencia práctica propuesta para el Laboratorio Remoto

El LR ha sido empleado en cursos de Diseño Lógico Digital mediante nueve prácticas que fueron diseñadas para cubrir el temario completo del curso. Las prácticas son diseñadas en clase y son implementadas por los estudiantes usando el lenguaje de descripción de hardware VHDL. Cada una de ellas es programada, simulada y sintetizada usando el ambiente de desarrollo Vivado. Las prácticas son las siguientes: Diseño combinatorio, implementación de Flip-Flops, implementación de registros, detector de secuencia binaria con Máquinas de Mealy, mensaje multiplexado con Máquinas de Moore, contadores y sus aplicaciones, aplicaciones de las Máquinas de Mealy con sensores, memorias y cartas ASM. Cada una de las prácticas complementan las diferentes actividades de aprendizaje desarrolladas durante el curso como son la impartición de las clases presenciales, el desarrollo de ejercicios, tareas y las actividades de evaluación.

2. Resultados

2.1 Evaluación usando el Modelo de Aceptación de Tecnología

El LR es evaluado con un diseño cuasi-experimental, mediante una encuesta que utiliza el Modelo de Aceptación de Tecnología (TAM – Technology Acceptance Model) el cual es un marco teórico desarrollado por Fred Davis

(1989) para comprender y predecir la aceptación y adopción de tecnología por parte de los usuarios. El modelo utiliza las variables mostradas en la Figura 3.

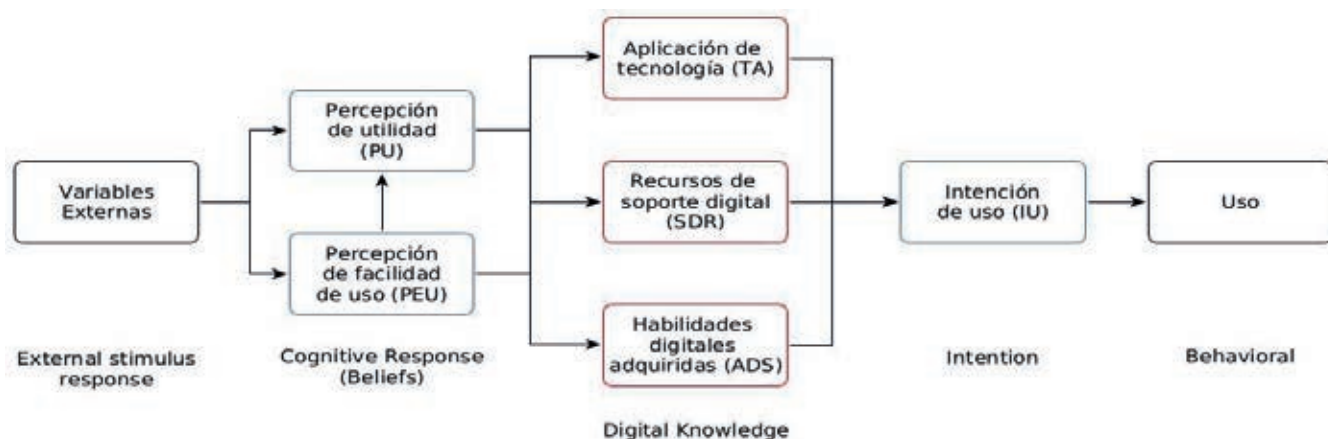


Figura 3

Modelo de Aceptación de Tecnología.laboratorio remoto.

Las variables del TAM se explican a continuación: **PU - Perceived Usefulness**, es definido como el grado en que una persona cree que el uso de un sistema particular mejoraría su desempeño laboral. **PEU - Perceived Easy of Use**, se refiere al grado en que una persona cree que usar un sistema particular estaría libre de esfuerzo. **IU - Intention to Use**, Se refiere al grado en que una persona seguirá usando un sistema particular. **TA - Technology Application**, se refiere al grado en que una persona utiliza conocimientos de base de áreas relacionadas a la tecnología que se está usando. **SDR - Support Digital Resources**, se refiere a los recursos digitales disponibles para el manejo y uso de la tecnología. **ADS - Acquired Digital Skills**, se refiere al conocimiento adquirido por el aprendizaje de tecnologías digitales necesarias para el uso de un sistema particular.

Con estas variables se diseñó un instrumento de recolección de datos formado por una encuesta de 19 *items* los cuales se muestran en la tabla 1. Además, se recolectan datos del Perfil del estudiante (SP - Student Profile) como la Edad (SP1) y Género (SP2). Los *items* mostrados en la tabla 1 fueron aplicados durante el semestre 2024-2 a 28 estudiantes del grupo 4CV4 del curso de Diseño de Sistemas Digitales de la Escuela Superior de Cómputo (ESCOM) del IPN, usando el enfoque de aprendizaje *B-Learning* (Núñez-Barriopedro *et al.*, 2019), mediante una encuesta auto-administrada con *items* pre-codificados usando la escala de Likert. Esta escala consiste de los valores: totalmente de acuerdo (tda), de acuerdo (da), neutro (n), en desacuerdo (dsa), totalmente en desacuerdo (tdsa).

Con respecto al *item* SP1, los estudiantes encuestados tienen entre 19 y 23 años, donde el 46.4% tiene 20 años. Con respecto al *item* SP2, el 85.7% de los estudiantes son masculinos y el 14.3% femeninos. Los resultados obtenidos de los demás *items* se muestran en la Tabla 2.

Para determinar la confiabilidad del instrumento de recolección de datos se usó el Coeficiente Alfa de Cronbach (Oviedo y Campo-Arias, 2005; Streiner,

2003), el cual es obtenido calculando las varianzas de las respuestas dadas por cada muestra de cada *item*. Su ecuación está dada por:

$$\alpha = \frac{k}{(k-1)} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2}{\sigma_T^2} \right) \quad (1)$$

El valor calculado del Coeficiente Alfa de Cronbach es de 0.86, lo cual indica que el instrumento de recolección de datos tiene una buena consistencia interna.

TABLA 1.
ITEMS DE CADA VARIABLE DEL TAM

Tag	Items
PU1	El uso del laboratorio remoto me permitió realizar prácticas a distancia.
PU2	El LR me permitió aprender conocimiento práctico de los temas vistos en el curso.
PU3	El LR me permitió experimentar desde cualquier lugar y momento.
PU4	El LR me permitió auto-organizarme con mi equipo para la realización de prácticas.
PEU1	La aplicación para la programación del archivo binario en el FPGA es simple de usar.
PEU2	La aplicación para asignar valores de entrada a las prácticas es clara y simple.
PEU3	El servidor de video permite visualizar los resultados de las prácticas.
PEU4	La visualización de imagen mediante el servidor de video es clara y nítida.
PEU5	La asignación de terminales mediante el conector LAB REMOTO es claro y simple.
TA1	El LR me permitió adquirir y aplicar conocimientos del curso de redes de computadoras.
TA2	El LR me permitió adquirir y aplicar conocimientos del curso de Sistemas Operativos.
SDR1	Los materiales educativos del LMS ayudan en el aprendizaje de los temas del curso.
SDR2	Los materiales educativos del LMS ayudan en el manejo del laboratorio remoto.
SDR3	Los diseños visuales e interactivos de cada práctica permiten desarrollar su programación.
ADS1	El LR me permitió usar diferentes dispositivos para la experimentación de prácticas.
ADS2	El LR me permitió usar aplicaciones móviles para la experimentación de prácticas.
ADS3	La herramienta de desarrollo Vivado me permitió desarrollar los programas en HDL.
IU1	Te gustaría seguir usando el LR en otros cursos académicos.
IU2	Te gustaría seguir usando el LR para el desarrollo y aprendizaje de proyectos académicos.

2.2 Discusión

En la Tabla 2 se muestran los resultados para las diferentes variables. Con respecto a los *items* de la variable PU, el porcentaje conjunto de las escalas (tda) y (da) se encuentra entre 67.8% y 100% por lo que el LR permite la realización de prácticas de Diseño Lógico Digital. Con respecto a los *items* de la variable PEU, el porcentaje conjunto de las escalas (tda) y (da) se encuentra entre 89.3% y 100% por lo que las aplicaciones desarrolladas en el SoC permiten la interacción y manipulación del LR mediante la tarjeta de desarrollo basada en FPGA. Con respecto a los *items* de la variable TA, el porcentaje conjunto de las escalas (tda) y (da) se encuentra entre 82.1% y 85.7% por lo que el conocimiento adquirido en otros cursos es aplicado y/o aprendido en el manejo del LR.

TABLA 2.
RESULTADOS DE LA ENCUESTA APLICADA

Variable	Tag	(dsa)	(n)	(da)	(tda)	Variable	Tag	(dsa)	(n)	(da)	(tda)
PU	PU1		7.1%	7.1%	85.7%	TA	TA1		14.3%	39.3%	46.4%
	PU2		3.6%	14.3%	82.1%		TA2	3.6%	14.3%	46.4%	35.7%
	PU3			21.4%	78.6%	SDR	SDR1			25%	75%
	PU4	3.6%	28.6%	7.1%	60.7%		SDR2			28.6%	71.4%
PEU	PEU1		10.7%	14.3%	75%		SDR3			10.7%	89.3%
	PEU2	3.6%	7.1%	14.3%	75%	ADS	ADS1		3.6%	10.7%	85.7%
	PEU3			14.3%	85.7%		ADS2		3.6%		96.4%
	PEU4		10.7%	25%	64.3%		ADS3		3.6%	10.7%	85.7%
	PEU5	3.6%	7.1%	28.6%	60.7%	IU	IU1		3.6%	7.1%	89.3%
							IU2		3.6%	7.1%	89.3%

Con respecto a los *items* de la variable SDR, el porcentaje conjunto de las escalas (tda) y (da) es de 100% por lo que los Recursos de Soporte Digital presentan un diseño tecno-pedagógico correcto para el uso del LR. Con respecto a los *items* de la variable ADS, el porcentaje conjunto de las escalas (tda) y (da) es de 96.4% por lo que se usaron distintos dispositivos de cómputo para el manejo del LR, así como el aprendió a usar la herramienta CAD-EDA de Xilinx. Con respecto a los *items* de la variable IU, el porcentaje

conjunto de las escalas (tda) y (da) es de 96.4% por lo que los estudiantes usarían, en nuevos cursos o proyectos, el LR. Estos resultados muestran una aceptación muy alta entre los estudiantes para el uso del LR.

Conclusiones

Desde que inició la I4.0 han surgido diversas tecnologías que pueden aplicarse en el campo educativo para mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje, más aún, se puede aplicar el modelo de la Educación 4.0 mediante los enfoques de aprendizaje *E-learning* y *B-learning* en distintos cursos de los diferentes niveles educativos. Una forma de hacer esto, es con el desarrollo de aplicaciones usando el entorno tecnológico del IoT mediante SoC's. La arquitectura presentada, permite la implementación de los LR's con tecnología de bajo costo y gran eficiencia en diferentes áreas. Particularmente, en el área de Diseño Lógico Digital se pueden manipular e interactuar, con sistemas de desarrollo basados en FPGA's, de forma remota.

Para realizar la manipulación e interacción del LR se diseñaron nueve prácticas que permiten reforzar el aprendizaje de los temas teóricos vistos en clase mediante un nuevo entorno tecnológico y ambiente de aprendizaje, no solo constructivista sino conectivista.

El TAM es aplicado mediante las variables PU, PEU, TA, SDR, ADS, IU para determinar la aceptación del LR por parte de los estudiantes. La encuesta aplicada obtuvo porcentajes muy altos en cada variable pudiendo concluir que el LR es ampliamente aceptado por los estudiantes.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por la DGAPA-UNAM a través del proyecto IT400222, que forma parte del PAPIIT-UNAM. Se recibió apoyo adicional de la SIP-IPN a través del Proyecto Multidisciplinario SIP: 20240533 y el Proyecto de Innovación SIP: 20231117. Finalmente, los autores expresan su agradecimiento al CONAHCyT por la beca nacional de posgrado.

Referencias

- Ariza, J. Á., & Gil, S. G. (2022). RaspyLab: A low-cost remote laboratory to learn programming and physical computing through Python and Raspberry Pi. *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, 17(2), 140-149.
- Booch, G., Rumbaugh, J., & Jacobson, I. (2021). *The unified modeling language reference manual*. Addison-Wesley.
- Coop, I. S. (2006). Una metodología para el desarrollo de hardware y software embebidos en sistemas críticos de seguridad. *liisci. org.*, 70-75.
- Chevalier, A., Copot, C., Ionescu, C., & De Keyser, R. (2016). A three-year feedback study of a remote laboratory used in control engineering studies. *IEEE Transactions on Education*, 60(2), 127-133.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS quarterly*, 319-340. <https://doi.org/10.2307/249008>
- Digilent Inc. (2025). Nexys4 DDR™ FPGA Reference Manual. Recuperado el 15 de marzo de 2025, de <https://digilent.com/reference/programmable-logic/nexys-4-ddr/reference-manual>
- Downes, S. (2022). Connectivism. *Asian Journal of Distance Education*, 17(1), 58-87. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6173510>
- Fujieda, N., & Okuchi, A. (2023, November). A novel remote fpga lab platform using mcu-based controller board. En *2023 IEEE International Conference on Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE)*, 1-6.
- Kumar, S., Tiwari, P., & Zymbler, M. (2019). Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. *Journal of Big data*, 6(1), 1-21.
- Milenkovic, M. (2020). *Internet of Things: Concepts and System Design*. Springer Nature.
- Melosik, M., Naumowicz, M., Kropidłowski, M., & Marszałek, W. (2022). Remote prototyping of FPGA-based devices in the IoT concept during the COVID-19 pandemic. *Electronics*, 11(9), 1497.
- Mukul, E., & Büyükköçkan, G. (2023). Digital transformation in education: A systematic review of education 4.0. *Technological forecasting and social change*, 194, 122664.
- Naciones Unidas (2018), *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe* (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.
- Navas-González, R., Oballe-Peinado, Ó., Castellanos-Ramos, J., Rosas-Cervantes, D., & Sánchez-Durán, J. A. (2023). Practice projects for an fpga-based remote laboratory to teach and learn digital electronics. *Information*, 14(10), 558.
- Núñez-Barriopedro, E., Monclúz, I. M., & Ravina-Ripoll, R. (2019). El impacto de la utilización de la modalidad B-Learning en la educación superior. *Alteridad. Revista de Educación*, 14(1), 26-39.
- Oviedo, H. C., & Campo-Arias, A. (2005). Aproximación al uso del coeficiente alfa de Cronbach. *Revista colombiana de psiquiatría*, 34(4), 572-580.
- RaspberryPi. (2025). Raspberry Pi 4 Model B. Raspberry Pi Ltd. Recuperado el 15 de marzo de 2025, de <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf>.
- Schwab, K. (2016). *La Cuarta Revolución Industrial*. Ginebra, Suiza: World Economic Forum.
- Siemens, G. (2005). Connectivism: A learning theory for the digital age. *International Journal of Instructional Technology and Distance Learning*, Recuperado el 15 de marzo de 2025, de http://www.itdl.org/Journal/Jan_05/article01.htm.
- Streiner, D. L. (2003). Starting at the beginning: an introduction to coefficient alpha and internal consistency. *Journal of Personality Assessment*, 80(1), 99-103.
- Trilla, J., & García, E. C. (2001). *El legado pedagógico del siglo XX para la escuela del siglo XXI (Vol. 241)*. Barcelona: Graó.
- Van Dijk, J. (2020). *The digital divide*. John Wiley & Sons.

Fotografías

<https://www.pc-europe.ites6-tipos-de-dispositivos-semiconductores-y-sus-aplicacionesOwp4DDzMaXdzBsyM4QbRH6RM2hyIAbp6d>

Digitalización de las Cartas de Crédito Mediante DLT para Agilizar su Emisión y Ejecución

Isaías Cerqueda García

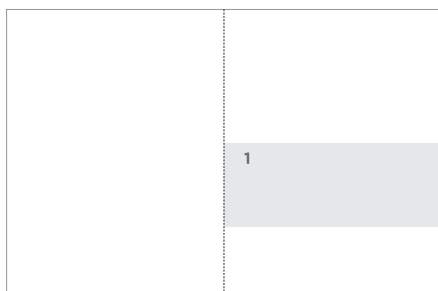


Resumen

Este estudio analiza cómo la Tecnología de Contabilidad Distribuida (DLT, por sus siglas en inglés) puede agilizar la emisión y ejecución de cartas de crédito mediante contratos inteligentes, centrándose en la DLT Corda implementada en el proyecto Contour. A través de un análisis cualitativo de 13 proyectos piloto, se demuestra que la DLT reduce el tiempo de procesamiento de 5-10 días a menos de 24 horas y disminuye la documentación en más del 50%. La integración de contratos inteligentes ricardianos mejora la sincronización de datos, la transparencia, la seguridad

Acerca del autor

¹UNAM



<httpswww.intercam.com.mxempresasbanca-de-empresascreditocartas-de-credito>

y la eficiencia operativa. Estos hallazgos sugieren que la DLT tiene un potencial transformador para modernizar el financiamiento comercial. Sin embargo, su adopción generalizada requiere marcos regulatorios armonizados y colaboración entre instituciones financieras, proveedores tecnológicos y reguladores. En conjunto, la DLT se posiciona como una solución innovadora para optimizar los procesos documentales y operativos en el comercio global.

Palabras clave: Transformación digital, DLT, carta de crédito, contratos ricardianos, Corda.

Abstract

This study analyzes how Distributed Ledger Technology (DLT) can streamline the issuance and execution of letters of credit through smart contracts, focusing on the Corda DLT implemented in the Contour project. Through a qualitative analysis of 13 pilot projects, it is shown that DLT reduces processing time from 5-10 days to less than 24 hours and decreases documentation by more than 50%. The integration of Ricardian smart contracts improves data synchronization, transparency, security, and operational efficiency. These findings suggest that DLT has transformative potential to modernize trade finance. However, its widespread adoption requires harmonized regulatory frameworks and collaboration between financial institutions, technology providers, and regulators. Together, DLT is positioned as an innovative solution to optimize documentary and operational processes in global trade.

Keywords: Digital transformation, DLT, letter of credit, Ricardian contracts, Corda.

Introducción

El comercio internacional se apoya en mecanismos financieros como la carta de crédito para asegurar transacciones. Aunque es una garantía de pago común, su implementación tradicional presenta desafíos. Las cartas de crédito presentan un problema principal: su procesamiento prolongado, de 5 a 10 días. Este tiempo incluye la preparación de la solicitud, la revisión y aprobación bancaria, y el envío al banco del beneficiario, afectando la agilidad comercial. La tardanza se debe a la intervención de múltiples actores como bancos, agencias reguladoras y empresas, lo que, sumado a la verificación manual de documentos y la falta de interoperabilidad, resulta en un proceso lento y propenso a errores. Ante esto, la Tecnología de Contabilidad Distribuida (DLT) surge como una solución innovadora, permitiendo la descentralización y sincronización en tiempo real de la información entre todos los involucrados en una transacción.

Por lo anterior, la pregunta que guía esta investigación es la siguiente: ¿Cuál es el potencial de la Tecnología de Contabilidad Distribuida (DLT) mediante contratos inteligentes para reducir el tiempo de procesamiento de una carta de crédito en el comercio internacional?

La DLT acelera el procesamiento de cartas de crédito de 5-10 días a 24-48 horas, gracias a la automatización con contratos inteligentes y la eliminación de intermediarios. Garantiza transparencia, inmutabilidad y reduce fraudes, ofreciendo un registro confiable para todos. Además, optimiza la coordinación entre instituciones financieras y empresas, integrando sistemas fragmentados y minimizando errores.

DLT puede reducir costos y agilizar el financiamiento del comercio internacional, impulsando la competitividad y digitalización del sector. El objetivo es evaluar el potencial de DLT para reducir el tiempo de procesamiento de cartas de crédito, analizando su eficiencia, transparencia y seguridad.

- Investigar el funcionamiento de DLT.
- Analizar el proyecto Contour basado en la DLT Corda.
- Evaluar el impacto de proyectos pilotos basados en Contour.
- Determinar los beneficios y desafíos de la aplicación de DLT en cartas de crédito en el contexto del comercio internacional.

Para lograr estos objetivos, se utilizó un enfoque metodológico cualitativo, basado en una revisión documental de fuentes primarias y secundarias, así como en el análisis de estudios de casos múltiples centrados en la implementación de DLT mediante contratos inteligentes en la automatización de cartas de crédito, específicamente mediante el proyecto Contour.

Además, se implementó un enfoque metodológico cualitativo, en el que se realizó una revisión documental de fuentes primarias y secundarias. Además, se llevó a cabo un análisis de estudios de casos múltiples centrado en la implementación de la DLT en la automatización de cartas de crédito basados en el proyecto Contour.

Los hallazgos indican que la aplicación de la DLT mediante Contratos Ricardianos en cartas de crédito puede reducir drásticamente los tiempos de procesamiento. En el caso de los proyectos pilotos que se analizaron demostraron una reducción de 5 a 10 días a menos de 24 horas, una reducción entre el 80% a 90%. Esto sugiere que la automatización de procesos mediante DLT tiene el potencial de transformar el financiamiento del comercio internacional.

Los resultados obtenidos en los casos de estudio y en la revisión documental demuestran que la implementación de la DLT a través de los Contratos Ricardianos en el procesamiento de cartas de crédito tiene un impacto positivo en la eficiencia del comercio internacional. La reducción del tiempo de tramitación, junto con el aumento de la transparencia y la seguridad, sugiere que esta tecnología podría convertirse en un estándar para el financiamiento del comercio global.

Investigaciones previas han destacado el uso de tecnologías Blockchain en el procesamiento de cartas de crédito. Por ejemplo, Belu (2019) señala que la adopción de Blockchain simplifica el flujo de pagos, mejora la gestión documental y reduce costos operativos. Chang et al. (2019), por su parte, identifican en múltiples casos piloto el potencial de Blockchain para transformar las operaciones comerciales gracias a su inmutabilidad, transparencia e interoperabilidad, características que ayudan a reducir la manipulación de documentos físicos, fortalecer la confianza entre las partes y promover prácticas sostenibles en el comercio internacional.

Al-Abri *et al.* (2020) también coinciden en que Blockchain puede optimizar los tiempos de intercambio de documentos, mejorar la seguridad y facilitar la sinergia entre actores del comercio. Ruslan (2022) complementa estos

hallazgos al indicar que Blockchain, junto con sistemas digitales como contratos inteligentes e Internet de las Cosas (IoT), permite acelerar procesos y aumentar la transparencia en transacciones internacionales. No obstante, estas investigaciones también identifican limitaciones importantes en el uso de Blockchain, tales como restricciones en escalabilidad, problemas de interoperabilidad, la necesidad de intervención humana en ciertos procesos y barreras legales derivadas de la falta de marcos regulatorios consolidados. Es aquí donde se justifica el interés en DLT en general, y en Corda en particular.

A diferencia de Blockchain público, Corda está diseñado específicamente para entornos empresariales y regulados, como son los sectores financiero y comercial. Una de sus ventajas clave es la incorporación de Contratos Ricardianos, que integran código ejecutable con lenguaje legal comprensible para humanos. Esto permite que los acuerdos contractuales sean tanto técnicamente válidos como jurídicamente vinculantes, algo fundamental en el procesamiento de cartas de crédito, donde la validez legal es tan importante como la automatización. Por ello, aunque investigaciones anteriores han destacado el potencial de Blockchain, este estudio propone que DLT, específicamente Corda, ofrece una solución más viable y adaptada a las exigencias del comercio internacional regulado, al combinar tecnología avanzada con compatibilidad legal, transparencia controlada y participación autorizada de los actores involucrados.

La DLT se posiciona como una tecnología trascendental dentro del ecosistema de tecnologías digitales inteligentes que conforman la Industria 4.0. Su arquitectura descentralizada no sólo digitaliza procesos, sino que redefine cómo se validan, ejecutan y aseguran las transacciones en entornos interconectados y globalizados. Esta transformación habilita un sistema más inteligente, autónomo y confiable, clave para enfrentar los desafíos de la economía digital.

En este contexto, los contratos inteligentes representan una innovación esencial, al permitir la automatización programada de acuerdos, eliminando intermediarios y reduciendo riesgos de incumplimiento. Mientras que la Inteligencia Artificial Generativa sobresale por su capacidad de crear contenido, interpretar lenguaje o asistir en tareas cognitivas, los contratos inteligentes actúan como mecanismos de acción y cumplimiento automático, alineados con reglas previamente definidas.

Sin embargo, uno de los grandes retos de los contratos inteligentes tradicionales es su débil vinculación legal. Aquí es donde los Contratos Ricardianos, implementados en plataformas como Corda, ofrecen una solución estratégica. Estos contratos no solo permiten la automatización como los contratos inteligentes, sino que combinan una representación legal legible para humanos con una representación ejecutable por máquina. Es decir, funcionan como puentes entre el mundo jurídico y el código, asegurando que los procesos automatizados cuenten con respaldo legal y validez normativa, algo crucial en sectores regulados como el financiero o el comercio internacional.

Por lo tanto, los Contratos Ricardianos no solo automatizan con seguridad, sino que fortalecen la legitimidad y confianza institucional en los sistemas inteligentes. Este enfoque híbrido entre derecho y automatización no ha sido suficientemente explorado, pero este estudio demuestra su potencial para crear un sistema financiero global más eficiente, trazable y conforme con marcos regulatorios internacionales.

1. Marco teórico

En los últimos años, la digitalización se ha acelerado en el comercio internacional, y el financiamiento comercial no ha sido la excepción. Un claro ejemplo de esta evolución es el uso de cartas de crédito, un mecanismo esencial para garantizar transacciones seguras entre compradores y vendedores en diferentes países. Una carta de crédito es una orden condicionada de pago que recibe un banco de pagar a un beneficiario (vendedor) por cuenta y orden de un ordenante (comprador) a través de un banco corresponsal, contra la presentación de determinados documentos de embarque o entrega de servicios. Su finalidad es facilitar el comercio externo e interno, eliminando la desconfianza y riesgo que pudiera existir entre comprador y vendedor (Bancomext, 2024).

De acuerdo con el Banco Santander, una carta de crédito funciona de la siguiente manera (Santander, 2024):

1. Mediante un documento, el importador solicita al Banco Emisor la apertura de la carta de crédito.
2. El Banco, tras el correspondiente estudio de riesgos, emite la carta de crédito al beneficiario.
3. El Banco Avisador comunica la apertura de la carta de crédito al beneficiario.
4. El exportador embarca las mercancías y las hace llegar hasta el país de destino.
5. El beneficiario entrega documentos al Banco Avisador.
6. El Banco Avisador envía los documentos recibidos al Banco Emisor.
7. El Banco Emisor paga al Banco Avisador.
8. El banco Avisador abona al beneficiario.
9. El Banco Emisor adeuda en cuenta al importador y le entregará los documentos.
10. El importador presenta la documentación en la aduana y retira la mercancía (Ver Figura 1).

La carta de crédito es un instrumento clave en el comercio internacional, pero su emisión puede tardar entre 5 a 10 días, lo que puede generar pérdidas económicas, especialmente en el caso de productos perecederos que podrían deteriorarse en ese tiempo. Por ello, la automatización de los procesos relacionados con la carta de crédito es crucial para reducir significativamente los tiempos de emisión.

Entre las tecnologías capaces de lograr esta optimización se encuentran los sistemas distribuidos, como Blockchain y la Tecnología de Contabilidad Distribuida (DLT, por sus siglas en inglés), mediante el uso de contratos inteligentes. La literatura reciente ha explorado ampliamente el impacto de estas tecnologías en la gestión de cartas de crédito.

Según Belu (2019), la adopción de Blockchain en los pagos mediante carta de crédito simplifica el proceso de pago, agiliza la gestión documental y reduce los costos asociados con este método. Por su parte, Chang et al. (2019) analizaron múltiples casos piloto y concluyeron que Blockchain tiene el potencial de transformar las operaciones comerciales gracias a su



Fuente: Elaboración propia con información de Santander (2024).

Figura 1

Funcionamiento de carta de crédito.

inmutabilidad, transparencia e interoperabilidad. Esto permitiría reducir la manipulación de documentos en papel, fortalecer la confianza entre los actores del comercio y fomentar entornos de negocio y finanzas sostenibles.

Al-Abri *et al.* (2020) destacan que Blockchain puede reducir los plazos en el intercambio de documentos de importación y exportación, optimizar el capital de trabajo y mejorar la seguridad, la transparencia y la sinergia entre las partes interesadas. De manera similar, Ruslan (2022) señala que esta tecnología, junto con la automatización mediante contratos inteligentes y el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés), permite acelerar procesos, aumentar la seguridad y mejorar la transparencia en las transacciones asociadas a las cartas de crédito.

No obstante, Blockchain también presenta desafíos. Entre sus principales limitaciones se encuentran la restricción en el número de entidades que pueden participar en la cadena de bloques, los problemas de interoperabilidad y la imposibilidad de automatizar completamente la revisión de documentos debido a la necesidad de juicio humano. Además, Blockchain no añade valor al proceso de pago si las partes acuerdan realizar transacciones fuera del ecosistema de criptomonedas. Sin embargo, el mayor obstáculo es el marco legal: la falta de regulación y las incertidumbres jurídicas limitan la escalabilidad de la tecnología. Por ello, resulta fundamental establecer acuerdos internacionales que armonicen el uso de Blockchain con las legislaciones nacionales (Ruslan, 2022).

Si bien Blockchain ofrece un gran potencial para la automatización de cartas de crédito, en entornos empresariales las soluciones basadas en DLT presentan una ventaja adicional. Dado que este tipo de sistemas opera bajo estrictos marcos regulatorios, algunas plataformas DLT han integrado Contratos

Ricardianos, es decir, contratos inteligentes con validez legal, lo cual es esencial en sectores altamente regulados como el comercio internacional. Un ejemplo destacado de estas plataformas es Corda, desarrollada por la empresa R3.

En el ámbito de las tecnologías de registro distribuido, es común encontrar cierta confusión entre los términos Blockchain y DLT. A menudo, se consideran sinónimos, pero es importante aclarar que Blockchain es un tipo de DLT, mientras que DLT no es Blockchain. Una diferencia crítica entre DLT y Blockchain es que DLT no necesariamente consiste en bloques de transacciones para mantener el libro mayor en crecimiento. En cambio, Blockchain es un tipo especial de base de datos compartida que sí se compone de bloques de transacciones. Un ejemplo de una DLT que no utiliza bloques de transacciones es Corda de R3. Corda es una DLT que se desarrolló para registrar y administrar acuerdos y está especialmente enfocado en la industria de servicios financieros. Por otro lado, las Block Chains más conocidas, como Bitcoin y Ethereum, sí hacen uso de bloques para actualizar la base de datos compartida (Bashir, 2018).

Mohanty (2019) señala que, aunque ambas tecnologías comparten el uso de criptografía asimétrica, funciones hashing y comunicación peer-to-peer, difieren en aspectos clave: Blockchain exige una moneda nativa y es totalmente distribuida y sin permisos, usando PoW o PoS. En contraste, una DLT no requiere moneda nativa, no siempre es distribuida, puede ser con permisos y no se limita a esos modelos de consenso.

DLT se centra en una base de datos codificada y distribuida donde se almacenan los registros de las transacciones. Una DLT es una base de datos dispersa en varias computadoras, nodos, instituciones o países, y a la que pueden acceder múltiples personas en todo el mundo (Geeks for geeks, 2024b). Asimismo, DLT es un subconjunto de los sistemas distribuidos, es decir, sistemas que consisten en múltiples componentes independientes (por ejemplo, computadoras) que se comunican entre sí. Con frecuencia, estos sistemas se basan en una arquitectura peer-to-peer (P2P), donde los nodos intercambian mensajes directamente entre ellos sin pasar por un servidor central. Los sistemas DLT están diseñados específicamente para operar en condiciones adversas, de modo que puedan seguir funcionando incluso ante la presencia de componentes poco confiables (como fallos de hardware o problemas de conectividad) y actores maliciosos que intentan sabotear el sistema (Rauchs *et al.*, 2019).

Corda es una plataforma DLT desarrollada por R3, diseñada específicamente para el sector financiero y otros entornos altamente regulados. A diferencia de Blockchains como Bitcoin o Ethereum, Corda no utiliza bloques de transacciones, lo que la distingue como una DLT única. Su enfoque en la privacidad, escalabilidad e interoperabilidad la convierte en una solución ideal para instituciones que deben cumplir con normativas legales y de cumplimiento estrictas. Corda opera como una red permissionada, donde solo los participantes autorizados pueden unirse y realizar transacciones. Además, no emplea un protocolo de difusión masiva (gossip protocol), sino que las transacciones se comparten únicamente con las partes directamente involucradas, garantizando un alto nivel de privacidad (Geeks for Geeks, 2024a).

Como se ha mencionado la DLT Corda no hace uso de bloques de transacción. Ahora bien vamos a conocer lo que es Corda. Corda es una plataforma DLT diseñada específicamente para el sector financiero y otros sectores altamente

regulados. Desarrollada por la empresa R3, Corda se distingue por su enfoque en la privacidad, la escalabilidad y la interoperabilidad, lo que la convierte en una solución ideal para instituciones financieras y empresas que necesitan cumplir con estrictas normativas legales y de cumplimiento. Corda opera como una red DLT permitida, lo que significa que solo los participantes autorizados pueden unirse a la red y realizar transacciones. A diferencia de otras blockchains públicas como Bitcoin o Ethereum, Corda no utiliza un protocolo de difusión masiva (gossip protocol) para transmitir transacciones a todos los nodos. En su lugar, las transacciones se comparten solo con las partes directamente involucradas, lo que garantiza un alto nivel de privacidad.

Los componentes de Corda son los siguientes (Holbrook, 2020):

- **Nodos:** Los nodos se comunican entre sí para realizar transacciones y ejecutar contratos inteligentes. Solo comparten información con quienes necesitan saber, lo que garantiza privacidad.
- **Notarios:** Validan que las transacciones sean únicas y correctas antes de que se aprueben. No todas las transacciones pasan por un notario, solo las que lo requieren.
- **CorDapps:** Automatizan procesos y permiten que las partes involucradas lleguen a acuerdos sin necesidad de intermediarios.
- **Estados:** Los estados evolucionan con el tiempo. Cuando se realiza una transacción, el estado anterior se marca como “consumido” y se crea un nuevo estado actualizado.
- **Contratos inteligentes:** Validan que las transacciones cumplan con las reglas acordadas.
- **Flujos:** Coordinan la comunicación entre los nodos para que las transacciones se completen correctamente.
- **Oráculos:** Verifican datos externos, como tasas de cambio o precios de acciones, para que los contratos inteligentes puedan usarlos.
- **Vaults:** Guardan la información relevante para cada participante. Solo el nodo dueño del vault puede acceder a sus datos, lo que garantiza privacidad.

Los contratos inteligentes son programas de computadora que automatizan tareas bajo condiciones predefinidas, ejecutándose automáticamente y basándose en la codificación de reglas en la cadena de bloques. A diferencia de los contratos tradicionales, no solo establecen términos, sino que también se ejecutan automáticamente según la programación. Funcionan con lógica IF-THEN, estableciendo condiciones y acciones correspondientes, ofreciendo ventajas como registros transparentes, autonomía en transacciones, reducción de fraude y mayor confianza, siendo rentables al eliminar intermediarios y reducir costos (Geeks for Geeks, 2024a). Los contratos inteligentes en Corda, conocidos como *contracts*, son una de las características más distintivas de la plataforma. A diferencia de otras DLT, los contratos en Corda no solo son código ejecutable, sino que también pueden incluir prosa legal vinculante (Contratos Ricardianos), lo que los hace jurídicamente exigibles en un tribunal. De acuerdo, con Geroni (2021), un Contrato Ricardiano es un tipo de contrato legal digital que combina un acuerdo legible por humanos con un formato legible por máquinas. Fue introducido por primera vez en 1995 por Ian Grigg,

un pionero en criptografía financiera. Este contrato es único porque:

- Es legalmente vinculante: Puede usarse en un tribunal como un contrato tradicional.
- Es legible por humanos: No sólo los abogados, sino cualquier persona puede entenderlo.
- Es legible por máquinas: Puede ser procesado y ejecutado automáticamente por software en una plataforma como Corda.

Aunque los Contratos Ricardianos fueron propuestos desde 1995 por Ian Grigg, su potencial para resolver problemas complejos en contextos reales ha sido poco explorado en la práctica. En la mayoría de los estudios previos sobre automatización de contratos o DLT, se ha puesto el foco en los contratos inteligentes tradicionales, sin considerar que estos carecen de respaldo legal directo. El caso analizado en esta investigación representa un ejemplo claro del valor práctico de los Contratos Ricardianos, ya que permite automatizar procesos financieros altamente regulados —como las cartas de crédito internacionales— sin sacrificar la validez jurídica ni la transparencia operativa. Al estar diseñados para ser legibles tanto por humanos como por máquinas, estos contratos ofrecen una solución híbrida única, que facilita la interoperabilidad entre los sistemas tecnológicos y los marcos regulatorios existentes. Así, el uso de Contratos Ricardianos en plataformas como Corda no solo demuestra su viabilidad técnica, sino también su capacidad transformadora en sectores donde la seguridad, la trazabilidad y la legalidad son indispensables.

2. Procedimientos experimentales

El presente estudio tiene como objetivo explorar el potencial de la Tecnología de Contabilidad Distribuida (DLT, por sus siglas en inglés) como una herramienta innovadora para optimizar los procesos tradicionales de financiamiento comercial, poniendo énfasis en la reducción de los tiempos operativos y la mejora de la eficiencia en la gestión documental. Para ello, se adopta un enfoque cualitativo basado en el método de estudio de casos múltiples, guiado por el marco teórico propuesto por Chang *et al.* (2020).

Según Chang *et al.* (2020), el estudio de casos permite analizar unidades específicas —como individuos, organizaciones, eventos o sistemas— desde una perspectiva profunda y contextualizada. Este método es particularmente útil cuando se desea comprender fenómenos complejos en contextos reales. Existen dos tipos principales de estudios de caso: el individual, que se centra en un solo caso, y el múltiple, que compara varios casos para identificar patrones y diferencias significativas. Aunque los estudios de casos múltiples implican mayor complejidad y demanda de recursos, permiten generar generalizaciones más sólidas y teorías basadas en evidencia empírica.

En esta investigación se opta por un diseño de casos múltiples con enfoque comparativo, lo cual permite analizar proyectos diversos que utilizan la plataforma Contour, basada en la tecnología de Corda Enterprise, desarrollada por R3. Esta elección metodológica posibilita identificar tendencias, desafíos y oportunidades recurrentes en el uso de DLT para Cartas de Crédito, así como formular recomendaciones que puedan ser extrapoladas a otras iniciativas similares en el ámbito del financiamiento comercial.

El proyecto Contour fue seleccionado como objeto principal de análisis por su carácter pionero en la digitalización de Cartas de Crédito mediante DLT. Iniciado en 2017 como una iniciativa conjunta entre R3 y ocho bancos internacionales, Contour se ha consolidado como una red DLT global centrada en el financiamiento comercial, alcanzando en 2020 su lanzamiento comercial. A la fecha, más de 50 bancos y corporaciones han participado en pruebas y pilotos en 27 países, lo cual proporciona un terreno fértil para el análisis comparativo de casos.

Se seleccionaron 13 proyectos de implementación de Contour entre 2018 y 2020, con base en los siguientes criterios:

- Participación verificable de instituciones financieras y corporaciones.
- Acceso público o privado a reportes técnicos, comunicados oficiales y entrevistas.
- Diversidad geográfica y sectorial.
- Grado de madurez del piloto (desde pruebas iniciales hasta despliegues en producción).

Uno de los casos más destacados incluye la importación de calzado desde Hong Kong a México, lo que permite analizar un caso con relevancia directa para el comercio internacional y regional. Este caso es especialmente significativo porque México, como una de las economías exportadoras más importantes de América Latina, enfrenta desafíos estructurales en sus procesos de financiamiento comercial, los cuales suelen estar marcados por la dependencia del papel, la burocracia y la falta de interoperabilidad entre sistemas. Analizar cómo México adopta soluciones basadas en DLT, como Contour, no solo permite evaluar su grado de preparación tecnológica y apertura a la innovación financiera, sino también identificar oportunidades para mejorar la competitividad de sus exportaciones. La inclusión de los otros 12 proyectos internacionales permite establecer una base comparativa más robusta para comprender los avances, brechas y aprendizajes en distintos contextos, lo que enriquece la interpretación de los resultados obtenidos en el caso mexicano.

La investigación se apoya en los siguientes instrumentos metodológicos:

- Revisión documental: Se analizaron fuentes primarias y secundarias como artículos académicos, informes técnicos, reportes de medios especializados y documentos oficiales de R3 y Contour, y otras entidades relacionadas.
- Análisis de casos: Se realizó un estudio comparativo de 13 proyectos implementados bajo Contour, con especial atención a los indicadores de eficiencia, reducción de tiempos, actores involucrados, y tecnologías integradas.
- Triangulación de fuentes: Se contrastó la información obtenida de distintas fuentes para validar hallazgos clave, identificar inconsistencias y enriquecer el análisis cualitativo.

3. Resultados

Para evaluar el potencial de la Tecnología de Contabilidad Distribuida (DLT) en la optimización de las Cartas de Crédito, en particular mediante Corda, se identificó el proyecto Contour. Este sistema, desarrollado sobre la plataforma Corda de R3, busca reducir significativamente los tiempos de procesamiento de las transacciones comerciales.

Según R3 (2020), Contour comenzó en 2017 como una cooperativa formada por ocho bancos y R3, con la visión de crear una red global basada en Blockchain para digitalizar el mercado de financiamiento comercial, valorado en 18 billones de dólares. En enero de 2020, la plataforma se lanzó comercialmente y actualmente cuenta con miembros como ING, Citi, CTBC, Standard Chartered, RBS, SEB, BNP Paribas, HSBC y Bangkok Bank. Más de 50 bancos y corporaciones han participado en pruebas que simulan transacciones digitales de Cartas de Crédito en 27 países y seis continentes.

A lo largo de los años, las Cartas de Crédito han sido el centro de diversas iniciativas de digitalización. Sin embargo, los procesos basados en papel siguen generando ineficiencias que incrementan costos, complejidad y tiempos de procesamiento. Estas limitaciones reducen los márgenes de negocio para los bancos y los colocan en una competencia constante con otras soluciones de financiamiento. Para abordar estos desafíos, los bancos fundadores eligieron Corda Enterprise de R3, debido a sus características de privacidad, seguridad y alto rendimiento en redes de financiamiento comercial.

La aplicación Contour, desarrollada por la empresa CryptoBLK sobre la plataforma Corda, ha demostrado reducir el tiempo de procesamiento de extremo a extremo de las Cartas de Crédito en un 90% o más. Desde mayo de 2018, la plataforma ha sido sometida a 14 pilotos públicos en 14 países, además de pruebas privadas, preparándose para una adopción a gran escala con bancos y corporaciones interesados en operar dentro de su red.

Las Cartas de Crédito han sido utilizadas durante siglos para brindar seguridad en transacciones internacionales. Sin embargo, a pesar de sus beneficios, su adopción ha disminuido debido a la ineficiencia y fragmentación de los procesos documentarios. La cantidad de documentación en papel, que no solo incluye los documentos financieros sino también los relacionados con la logística de bienes y servicios, genera errores costosos, demoras en el cumplimiento y mayores costos operativos. Esto ha impulsado el crecimiento de modelos de financiamiento basados en cuentas abiertas, que si bien son más ágiles, exponen a las corporaciones a mayores riesgos y reducen el mercado potencial para los bancos.

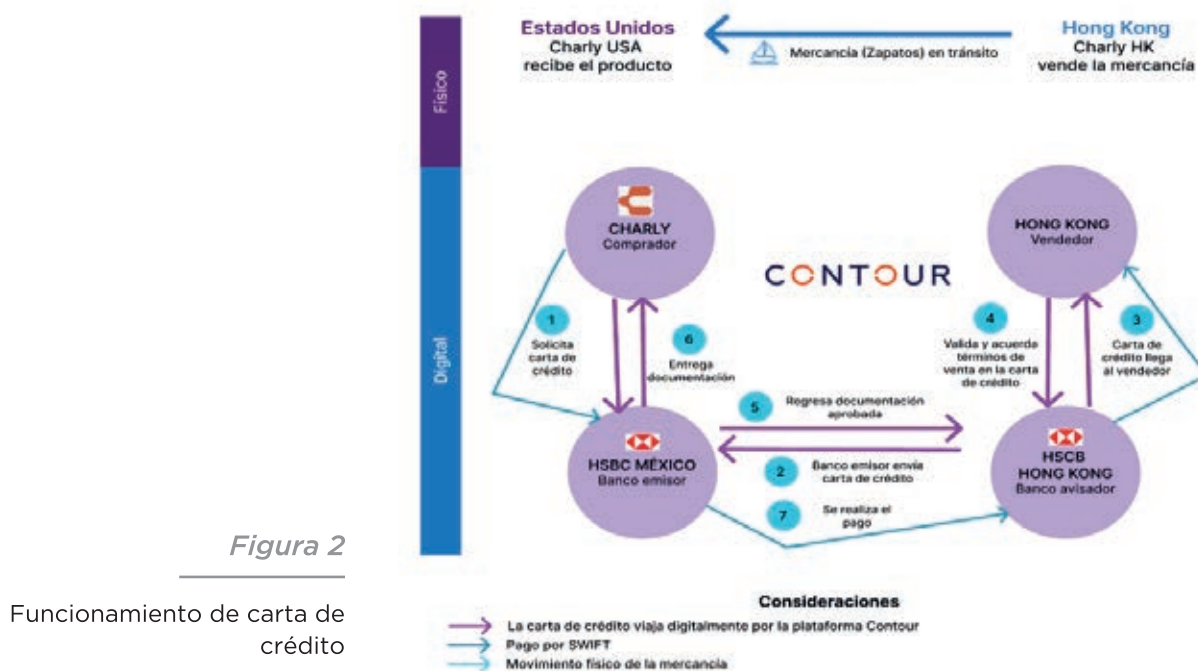
Contour soluciona estos problemas mediante APIs abiertas que integran múltiples redes digitales, garantizando una experiencia fluida y segura. Asociaciones estratégicas con essDocs y Bolero han permitido la integración de conocimientos de embarque electrónicos, facilitando el rastreo de documentos de manera segura. Asimismo, su colaboración con TradeCloud automatiza la gestión de Cartas de Crédito al vincular directamente las órdenes desde su plataforma. Por otro lado, la integración con la Plataforma de Contratos Inteligentes (ICP) de Chinsay digitaliza la emisión de contratos, mientras que la red ReChainME de Landmark Group permite rastrear la logística de los envíos en colaboración con HSBC dentro de Contour.

La plataforma también mejora la transparencia y eficiencia operativa:

- Transparencia: Los datos están sincronizados en tiempo real, eliminando la necesidad de conciliaciones.
- Rapidez: La digitalización completa del proceso reduce el papeleo en más del 50% y disminuye el tiempo de procesamiento de 10 días a 24 horas o menos.
- Seguridad: Solo las partes autorizadas pueden acceder a la información, protegida por Corda.
- Simplicidad: La experiencia de usuario es intuitiva gracias a plantillas y flujos de trabajo optimizados.

Estos beneficios tienen un impacto transformador en la cadena de valor del financiamiento comercial. Al eliminar la necesidad de recopilar y presentar documentos físicos, Contour permite que la documentación llegue junto con los bienes o incluso antes. Esto acelera los pagos, reduciendo los tiempos de semanas a días (R3, 2020).

El proceso de Contour, basado en la plataforma Corda, se estructura en tres fases para la gestión de Cartas de Crédito, según Mohanty (2019). En la Fase 1: Acuerdo de términos entre importador y exportador, formalizados en un contrato ricardiano (legal + contrato inteligente), creando un LetterOfCreditApplicationState en Corda firmado digitalmente, y aprobado automáticamente por el banco emisor mediante contrato inteligente. En la Fase 2: Envío de bienes por el exportador, creando un LetterOfCreditDeliveryState en Corda para rastrear el envío, y actualizaciones en tiempo real mediante sistemas de logística verificados por contratos inteligentes. Finalmente, en la



Fuente: Elaboración propia con base en HSBC (2020).

Fase 3: Generación de un ReceiptOfGoodsState en Corda al llegar los bienes, confirmando la entrega, y ejecutando automática el pago por el banco emisor mediante contrato inteligente. Un ejemplo concreto de la implementación de Contour utilizando Corda fue la importación de zapatos de la empresa mexicana Charly desde Hong Kong, gestionada a través de HSBC, como se ilustra en la Figura 2 (HSBC, 2020).

En esta investigación se empleó un estudio cualitativo con un enfoque de casos de estudio múltiples comparativo. Al analizar 13 proyectos piloto basados en Contour, se identificó que el tiempo promedio de emisión de una carta de crédito tradicional oscila entre 5 y 10 días, lo que confirma nuestra hipótesis sobre este rango de tiempo.

Asimismo, se observó una reducción significativa en los tiempos de procesamiento gracias a la aplicación de Tecnología de Contabilidad Distribuida (DLT, por sus siglas en inglés). En particular, el tiempo de emisión de las cartas de crédito se redujo en un rango del 80% al 90%, disminuyendo de 5-10 días a 24 horas o menos. Específicamente, el 80% corresponde a la reducción de 5 días a 24 horas, mientras que el 90% refleja la disminución de 10 días a 24 horas, lo que confirma nuestra hipótesis sobre una reducción superior al 80%, como se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1.
COMPARATIVO DE PROYECTOS DE CARTA DE CRÉDITO UTILIZANDO DLT

Año	Banco emisor	Banco avisador	Importador	Exportador	Detalles del envío	Reducción del tiempo
2018	HSBC	ING	Cargill	Cargill	Soja (Argentina a Malasia)	De 5-10 días a 24 horas
2018	ING	HSBC	Tricon	Reliance	Polipropileno (India a EE.UU.) Integración eBL	De 7-10 días a menos de 24 horas
2018	BNP Paribas	HSBC	Cargill	Rio Tinto	Mineral de hierro (Australia a China) Integración eBL	De 1-2 días a menos de 2 horas
2019	Bangkok Bank	Bangkok Bank	PT.Bukitnaga Masabadi	GC Marketing	Polietileno (Tailandia a Indonesia)	De 10 días a 24 horas
2019	HSBC	HSBC	SDIC	Fox & Lillie Woolmerchants	Lana (Australia a China)	No revelado
2019	HSBC UK	HSBC UK	Landmark Group (EAU)	Bee Dee Industries (China)	Bienes de consumo (China a EAU)	Reducción del 40% del tiempo de tramitación de la carta de crédito
2019	HSBC UK	HSBC UK	Duy Tan	INEOS Styrolution	Plásticos (Corea a Vietnam)	De 5-10 días a menos de 24 horas
2019	SCB	SCB	IRPC Public Company Limited	PTT International Trading Pte Ltd	Petróleo (Tailandia a Singapur)	No revelado
2019	HSBC	BNP Paribas	Cargill	Rio Tinto	Mineral de hierro (Australia a China)	De semanas a horas
2019	CTBC (Taiwan)	ING Słaski (Poland)	GRANULAT-CHIMIELARZ Spółka Jawna	Chi Mei Corporation	Taiwán a Polonia	No revelado
2019	HSBC	HSBC	Shenzhen MTC	MTC Electronic	Materias primas (Hong Kong a Shenzhen)	De 5-10 días a 5 horas
2019	HSBC Malaysia	HSBC Singapore	Singaporean chemicals company	Simply Packaging Sdn Bhd	Resina (Singapur a Malasia)	De 5-10 días a menos de 24 horas
2020	HSBC	HSBC	Charly	Hong Kong	Zapatos (México a Hong Kong)	De 5-10 días a menos de 24 horas

Fuente: Elaboración propia con base en R3 (2020) y HSBC (2020).

Además, se corrobora que la aplicación de DLT en la emisión de cartas de crédito proporciona mayor transparencia e inmutabilidad de los datos, reduciendo significativamente el riesgo de corrupción, fraude y manipulación de la información. Al ofrecer un entorno seguro y descentralizado, cada participante en la cadena de valor del financiamiento comercial tiene acceso a un registro confiable e inalterable, lo que fortalece la confianza y disminuye disputas entre las partes.

Por último, la implementación de DLT permite integrar sistemas previamente fragmentados, reduciendo redundancias y minimizando errores manuales

en la validación de documentos. Esto, a su vez, agiliza la verificación del cumplimiento de requisitos comerciales y regulatorios, optimizando el proceso en su totalidad.

En esta investigación el método utilizado fue un estudio cualitativo en casos de estudios múltiples comparativo. Al comparar 13 proyectos pilotos basados en Contour, se identificó que una carta de crédito tradicional tarda entre 5-10 días en promedio, lo que confirma nuestra hipótesis que tiene ese rango de tiempo en emitir una carta de crédito. También se identificó una reducción del 80% al 90%, pasando de 5-10 días a 24 horas o menos, el 80% se calculó que tardaba 5 días a 24 horas, mientras que el 90% se calculó que tardaba 5 días a 24 horas, lo que confirma nuestra hipótesis, una reducción entre el 80% al 90% como se muestra en la Tabla 1. También se confirma que aplicando DLT a carta de crédito tiene mayor transparencia e inmutabilidad de los datos, lo que reduce significativamente el riesgo de corrupción, fraude y manipulación de información. Al proporcionar un entorno seguro y descentralizado, cada participante en la cadena de valor del financiamiento comercial tiene acceso a un registro confiable e inalterable, lo que fomenta la confianza y disminuye disputas entre las partes. La implementación de DLT permite integrar sistemas previamente fragmentados, lo que disminuye redundancias y errores manuales en la validación de documentos, al tiempo que agiliza la verificación de cumplimiento de requisitos comerciales y regulatorios.

Conclusiones

Esta investigación analizó el potencial de la Tecnología de Contabilidad Distribuida (DLT, por sus siglas en inglés) para automatizar los procesos asociados a las Cartas de Crédito, con el objetivo de reducir significativamente los tiempos de ejecución y mejorar la eficiencia operativa. A través del proyecto Contour —plataforma construida sobre Corda—, que incluyó 13 proyectos piloto en distintos países, incluido México, se identificó que la implementación de DLT permite reducir los tiempos de procesamiento de una Carta de Crédito en un 80% a 90%. En el caso mexicano, este proceso pasó de un rango tradicional de 5 a 10 días a menos de 24 horas.

Además, la DLT utilizada en Contour no solo mejoró los tiempos, sino también la transparencia, al permitir que los datos se mantengan sincronizados en tiempo real, y fortaleció la seguridad, al restringir el acceso únicamente a las partes autorizadas. La reducción del papeleo fue superior al 50%, lo que demuestra su capacidad de digitalizar procesos tradicionalmente lentos, costosos y propensos a errores.

A diferencia de trabajos previos que han explorado soluciones Blockchain genéricas para el comercio internacional, esta investigación se centra en Corda, una plataforma DLT diseñada específicamente para entornos regulados. Uno de sus mayores aportes es la integración de Contratos Ricardianos, que permiten automatizar transacciones financieras con una representación legal vinculante. Esto representa un avance significativo hacia un comercio más inteligente y jurídicamente seguro, pues los Contratos Ricardianos combinan ejecución automática y cumplimiento legal, facilitando así la interoperabilidad entre actores y jurisdicciones.

Asimismo, este trabajo aporta una visión crítica sobre el futuro del comercio internacional, sugiriendo que tecnologías como DLT pueden complementar, e incluso superar en ciertos aspectos, otras tecnologías emergentes como la inteligencia artificial. En lugar de únicamente predecir o clasificar datos,

DLT tiene el potencial de reconfigurar la estructura misma del sistema financiero global, automatizando procesos, acortando plazos y promoviendo transacciones más confiables y eficientes.

De cara al futuro, las investigaciones deberían enfocarse en explorar soluciones complementarias como la tokenización de Cartas de Crédito, el uso de Monedas Digitales de Banco Central (CBDC) mayoristas, y su interoperabilidad con plataformas DLT como Corda. Estas integraciones podrían habilitar pagos automatizados mediante QR y aumentar la trazabilidad de extremo a extremo, aunque plantean también desafíos importantes en cuanto a identidad digital soberana y privacidad financiera.

Finalmente, este estudio destaca que los Contratos Ricardianos han sido poco explorados en la literatura académica respecto a su capacidad de automatizar procesos y, al mismo tiempo, ofrecer respaldo legal en entornos regulatorios complejos. La evidencia aquí presentada sugiere que dichos contratos pueden desempeñar un papel clave en la creación de sistemas financieros internacionales más ágiles, seguros y legalmente robustos.

Referencias

- Anwar, H. (2019, 30 de enero). Distributed Ledger Technology: Where Technological Revolution Starts. 101 blockchains. <https://101blockchains.com/distributed-ledger-technology-dlt/>
- Anwar, H. (2020, 09 de febrero). Contour Blockchain (Voltron): A Milestone for Trade Finance. 101 blockchains. <https://101blockchains.com/contour-blockchain/>
- Bashir, I. (2018). Mastering Blockchain: Distributed Ledger Technology, Decentralization, and Smart Contracts Explained, 2nd Edition. Packt Publishing.
- Chang, S.E. & Luo, L. & Chen, Y. (2019). Blockchain-Enabled Trade Finance Innovation: A Potential Paradigm Shift on Using Letter of Credit. Sustainability. 12 (188). 10.3390/su12010188.
- Geroni, D. (2021, 14 de septiembre). What are Ricardian Contracts? A Comprehensive Guide. 101 blockchains. <https://101blockchains.com/ricardian-contracts/>
- Holbrook, J. (2020). Architecting Enterprise Blockchain Solutions. Wiley
- Bancomext (Banco Nacional de Comercio Exterior). (2024). ¿Qué es una Carta de Crédito y cuál es su finalidad?. <https://www.gob.mx/bancomext/acciones-y-programas/cartas-de-credito-preguntas-frecuentes>
- HSBC. (2020, 08 de noviembre). Se concreta la primera operación piloto a través de Blockchain, para la empresa de ropa y calzado deportivo Grupo Charly. <https://www.empresas.hsbc.com.mx/es-mx/insights/managing-cash-flow/grupo-charly#:~:text=Transformaci%C3%B3n%20digital,Se%20concreta%20la%20primera%20operaci%C3%B3n%20piloto%20a%20trav%C3%A9s%20de%20Blockchain,y%20calzado%20deportivo%20Grupo%20Charly&text=Es%20la%20primera%20transacci%C3%B3n%20a,compa%C3%B1a%20que%20realizan%20comercio%20exterior.>
- Mohanty, D. (2019). R3 Corda for Architects and Developers: With Case Studies in Finance, Insurance, Healthcare, Travel, Telecom, and Agriculture. Apress.
- R3. (2020). The Network of Networks Digitalizing Trade Finance. <https://contour.network/wp-content/uploads/2021/07/4f499cec89af529a624584a64156ed218fc237.pdf>
- Santander. (2024). Medios de Pago. <https://santandertrade.com/es/portal/encontrar-socios/mexico/guia-comercio-exterior-medios-de-pago>
- Al-Abri, K. M., Al-Shukaili, A. R., Al-Maqarshi, S. R., & Al-Badi, H. M. (2020). Modernizing Letter of Credit with Blockchain Technology in Oman. Journal of Student Research. <https://doi.org/10.47611/jsr.vi.980>
- Belu, M.G. (2019). Application of Blockchain in International Trade: An Overview. The Romanian Economic Journal, 22, 2-15. https://www.researchgate.net/publication/332962248_Application_of_Blockchain_in_International_Trade_An_Overview
- Chang, S. E., Luo, H. L., & Chen, Y. (2020). Blockchain-Enabled Trade Finance Innovation: A Potential Paradigm Shift on Using Letter of Credit. Sustainability, 12(1), 188. <https://doi.org/10.3390/su12010188>
- Ruslan, Zuhri. (2022). Blockchain letter of credit: A systematic. Literature review. 11. https://www.researchgate.net/publication/363252493_BLOCKCHAIN_LETTER_OF_CREDIT_A_SYSTEMATIC_LITERATURE_REVIEW
- Rauchs, M., Blandin, A., Bear, K. & McKeon, S. (2019). 2nd Global Enterprise Blockchain Benchmarking Study. University of Cambridge: Judge Business School.
- Hileman, G., & Rauchs, M. (2017). 2017 Global Blockchain Benchmarking Study. SSRN Electronic Journal: Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3040224> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3040224>
- R3. (2020). The Network of Networks Digitalizing Trade Finance. Contour. <https://contour.network/wp-content/uploads/2021/07/4f499cec89af529a624584a64156ed218fc237.pdf>
- Geeks for geeks. (2024a, 23 de mayo). Smart Contracts in Blockchain. <https://www.geeksforgeeks.org/smart-contracts-in-blockchain/?ref=gcse>
- Geeks for geeks. (2024b, 17 de octubre). Blockchain and Distributed Ledger Technology (DLT). <https://www.geeksforgeeks.org/blockchain-and-distributed-ledger-technology-dlt/>

Fotografías

<https://www.intercam.com.mx/empresasbanca-de-empresascreditoscarteras-de-credito>

Identificación de Amenazas Zero-Day en Entornos Empresariales con Modelos de Aprendizaje Profundo

Ana Laura Bárcenas Medina^a
Alan Jair Alcaraz Cancio^a

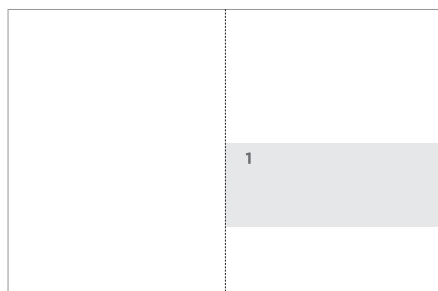


Resumen

En el panorama actual de la ciberseguridad, las amenazas zero-day constituyen uno de los desafíos más críticos debido a su naturaleza impredecible y la ausencia de patrones conocidos que faciliten su detección temprana. Este artículo aborda esta problemática mediante el diseño e implementación de un sistema basado en aprendizaje profundo,

Acerca de los autores

^a Ingeniería en Sistemas
Computacionales, TecNM-TES-Ecatepec



<https://www.tarlogic.com/es/blog/simulaciones-de-ransomware/>

que integra redes neuronales convolucionales (CNN) y recurrentes (RNN) para identificar dichas amenazas en tráfico de red empresarial. Utilizando conjuntos de datos reales y simulados, el modelo alcanzó una precisión del 96.84% superando significativamente los enfoques tradicionales basados en firmas. Estos resultados destacan la adaptabilidad y eficacia del sistema para enfrentar amenazas emergentes, reforzando la relevancia de las tecnologías avanzadas de inteligencia artificial como una herramienta esencial para proteger los activos digitales y garantizar la continuidad operativa en entornos empresariales.

Palabras clave: Aprendizaje profundo, ciberseguridad, detección proactiva, redes neuronales híbridas, tráfico de red, redes neuronales híbridas.

Abstract

In today's cybersecurity landscape, zero-day threats pose one of the most critical challenges due to their unpredictable nature and the lack of predefined patterns for early detection. This article addresses this issue by presenting the design and implementation of a deep learning-based system that combines convolutional neural networks (CNNs) and recurrent neural networks (RNNs) to identify such threats within enterprise network traffic. Using both real and simulated datasets, the model achieved an accuracy of 96.84%, significantly outperforming traditional signature-based approaches. These results highlight the system's adaptability and effectiveness in countering emerging threats, underscoring the importance of integrating advanced artificial intelligence technologies into enterprise cybersecurity to safeguard digital assets and ensure operational continuity.

Keywords: Cybersecurity, deep learning, proactive detection, network traffic, hybrid neural networks.

Introducción

En el actual entorno digital, las organizaciones enfrentan amenazas cada vez más sofisticadas que superan las capacidades de los sistemas tradicionales de seguridad. Entre ellas, los ataques Zero-Day destacan por su capacidad de explotar vulnerabilidades desconocidas sin dejar rastros previos, lo que dificulta su detección oportuna y aumenta su impacto (Smith & Taylor, 2020). Frente a esta problemática, diversos estudios han explorado soluciones basadas en inteligencia artificial. Por ejemplo, Kim y Park (2019) proponen el uso de redes neuronales para la detección temprana de anomalías, mientras que Sabharwal y Singhal (2021) desarrollaron un modelo híbrido CNN-RNN eficaz para analizar tráfico malicioso, y Cruz y Pineda (2021) destacan la capacidad del aprendizaje profundo para enfrentar ataques evasivos.

Este artículo presenta el desarrollo de un sistema de detección proactiva de amenazas Zero-Day en entornos empresariales, utilizando una arquitectura híbrida que combina redes neuronales convolucionales (CNN) para el análisis espacial y redes neuronales recurrentes tipo LSTM (RNN) para capturar la evolución temporal del tráfico de red. A través de este enfoque se busca mejorar la precisión, reducir los falsos positivos y adaptarse a las complejidades de los entornos empresariales modernos.

El sistema propuesto se valida mediante datos reales y simulados, y sus resultados se comparan con técnicas tradicionales, evidenciando su superioridad en términos de eficacia, velocidad de respuesta y capacidad

de adaptación. Esta investigación se alinea con trabajos recientes que posicionan al aprendizaje profundo como una herramienta transformadora en la ciberseguridad empresarial (Ortiz & Ramírez, 2021; Nguyen & Armitage, 2022), capaz de garantizar la continuidad operativa frente a un panorama de amenazas en constante evolución.

1. Materiales y método

El desarrollo de un sistema basado en modelos de aprendizaje profundo para la identificación de amenazas zero-day en entornos empresariales exige la integración de recursos tecnológicos avanzados, metodologías innovadoras y un enfoque multidisciplinario. Este apartado describe los materiales y herramientas empleados en la construcción del sistema.

1.1 Materiales

1.1.1 Infraestructura Tecnológica

Para la implementación del sistema, se utilizó una infraestructura tecnológica que garantizara la capacidad de procesamiento y almacenamiento requerida para manejar grandes volúmenes de datos empresariales:

- **Entorno de desarrollo:** Python 3.9, utilizando bibliotecas especializadas como TensorFlow, Keras y Scikit-learn para la construcción y entrenamiento de los modelos de aprendizaje profundo.
- **Base de datos:** Durante el proceso se realizan archivos como CSV para el entrenamiento del algoritmo, posteriormente, MongoDB para el almacenamiento de datos no estructurados y PostgreSQL para los datos estructurados.
- **Plataforma de pruebas:** Google Colab y Jupyter Notebook para la experimentación y visualización de resultados.

1.1.2 Conjunto de Datos

Para el entrenamiento y evaluación del modelo propuesto se utilizaron dos fuentes principales: bases de datos públicas ampliamente aceptadas en la literatura (BoT-IoT y UNSW-NB15) y datos simulados obtenidos mediante el uso de Wireshark en entornos de red controlados. Estos conjuntos de datos incluyen características relevantes del tráfico de red, tales como: a) Duración de flujo de red, b) Protocolos y tipos de tráfico, c) Comportamiento de los puertos y protocolos, d) Servicio asociado al tráfico, e) Estado de conexión, f) Tamaños de paquetes enviados y recibidos. Las capturas se procesaron en formato CSV, permitiendo extraer características relevantes como tipo de protocolo, duración de sesión, puertos de origen y destino, y estado de conexión.

1.2 Métodos

El procesamiento de los datos involucró varias etapas críticas para garantizar la calidad y relevancia de estos:

1. **Preprocesamiento de Datos:**
 - Normalización de las características (**X**) utilizando la técnica de Min-Max Scaling:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

- Conversión de etiquetas de tráfico (normal/anómalo) a formato binario mediante One-Hot Encoding.
- Eliminación de duplicados y valores atípicos utilizando algoritmos de detección de outliers basados en distancias Mahalanobis.

2. Selección de Características:

- Se empleó un análisis de correlación de características (ρ) para identificar las variables más influyentes en la detección de anomalías:

$$\rho = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$$

Las características con valores absolutos de $\rho > 0.5$ fueron seleccionadas para el entrenamiento.

El sistema se diseñó utilizando una combinación de redes neuronales convolucionales (CNN) y redes neuronales recurrentes (RNN) para capturar tanto las características espaciales como las temporales del tráfico de red:

1. Red Neuronal Convolucional (CNN):

- Capas convolucionales para la extracción de características locales en patrones de tráfico.
- Función de activación ReLU en cada capa para garantizar la no linealidad.
- **Red Neuronal Recurrente (RNN):**
- Capas LSTM (Long Short-Term Memory) para capturar dependencias temporales en los datos de tráfico.
- Implementación de dropout para prevenir el sobreajuste.

Modelo Completo:

$$Output = \sigma(W_2 \cdot LSTM(CNN(X)) + b_2)$$

```
# Capas CNN
model.add(Conv1D(filters=64, kernel_size=3, activation='relu', input_shape=(X_train.shape[1],
model.add(MaxPooling1D(pool_size=2))

# Capas LSTM
model.add(LSTM(50, return_sequences=True))
model.add(LSTM(50))
```

Figura 1

Implementación de código en
Google Colab.

Model: "sequential"

Layer (type)	Output Shape	Param #
dense (Dense)	(None, 128)	5,760
dropout (Dropout)	(None, 128)	0
dense_1 (Dense)	(None, 64)	8,256
dropout_1 (Dropout)	(None, 64)	0
dense_2 (Dense)	(None, 1)	65

Total params: 14,081 (55.00 KB)
Trainable params: 14,081 (55.00 KB)
Non-trainable params: 0 (0.00 B)

Figura 2

Resultado construcción del modelo.

El modelo fue entrenado utilizando el algoritmo de optimización Adam, con una tasa de aprendizaje inicial de 0.001 y un tamaño de lote (batch) de 1024. La función de pérdida utilizada fue la entropía cruzada binaria. El entrenamiento se llevó a cabo durante 200 épocas, donde se observó una mejora progresiva y consistente en las precisiones de entrenamiento y validación, indicando una buena capacidad del modelo para generalizar:

$$L = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i (\log \log (\hat{y}_i) + (1 - y_i) \log \log (1 - \hat{y}_i))]$$

Donde y_i es la etiqueta verdadera $\hat{y}_i$ la predicción del modelo.

```
# Paso 6: Entrenar el modelo
history = model.fit(X_train, y_train, epochs=200, batch_size=1024, validation_split=0.001, verbose=2)
```

Figura 3

Entrenamiento del modelo.

1.3 Procedimiento General

El desarrollo del sistema se llevó a cabo en las siguientes etapas:

1. Definición de Requisitos: Identificación de las características del tráfico de red relevantes para la detección de ataques zero-day.
2. Preprocesamiento de Datos: Limpieza, normalización y selección de características del conjunto de datos.
3. Diseño del Modelo: Construcción de la arquitectura del modelo CNN-RNN.

- 4. Entrenamiento y Validación: Entrenamiento del modelo con datos históricos y evaluación de su desempeño.
- 5. Implementación: Despliegue del sistema en un entorno simulado y pruebas funcionales.

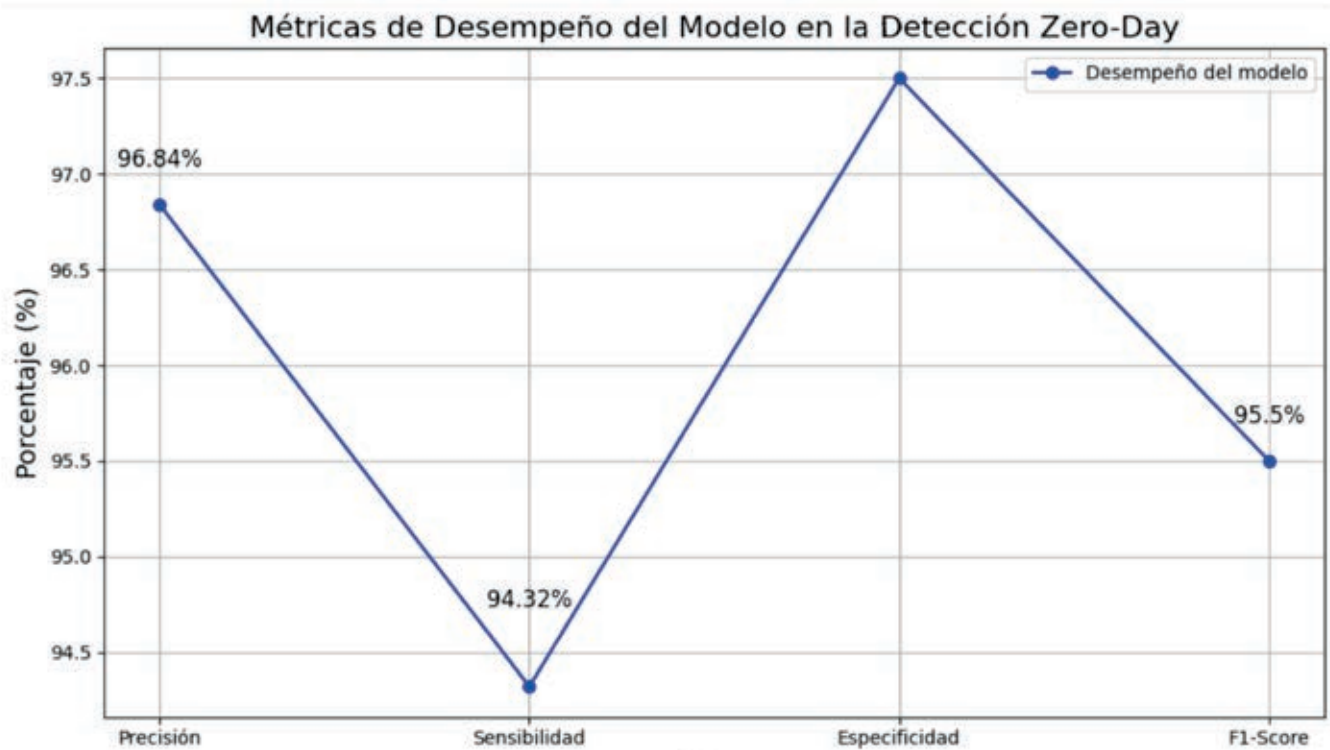
2 Resultados

La implementación del sistema basado en modelos de aprendizaje profundo para la identificación de amenazas zero-day en entornos empresariales generó resultados significativos que validan su efectividad en la detección de patrones anómalos y en la mejora de los tiempos de respuesta ante incidentes de seguridad. A continuación, se presentan los hallazgos principales, organizados en términos de desempeño técnico, métricas de evaluación, análisis de casos y comparaciones con sistemas tradicionales.

2.1 Desempeño Técnico del Modelo

El modelo híbrido CNN-RNN logró una precisión promedio del 96.84% durante las pruebas de validación cruzada, mostrando una alta capacidad para detectar amenazas Zero-Day. La métrica F1-Score alcanzó un 96.5%, lo que indica un buen equilibrio entre precisión y sensibilidad. Estos resultados reflejan la eficacia del sistema para identificar patrones anómalos en tráfico de red empresarial.

GRÁFICO 1.
PRECISIÓN PROMEDIO POR ITERACIÓN DE VALIDACIÓN CRUZADA.



```
import matplotlib.pyplot as plt

# Datos
metricas = ['Precisión', 'Sensibilidad', 'Especificidad', 'F1-Score']
valores = [96.84, 94.32, 97.5, 95.5]

# Crear gráfico
plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(metricas, valores, marker='o', color='blue', label='Desempeño del modelo')

# Personalización
plt.title('Métricas de Desempeño del Modelo en la Detección Zero-Day')
plt.ylabel('Porcentaje')
plt.legend()
plt.grid()

# Mostrar
plt.show()
```

Figura 4

Demostración del código manual sobre los resultados.

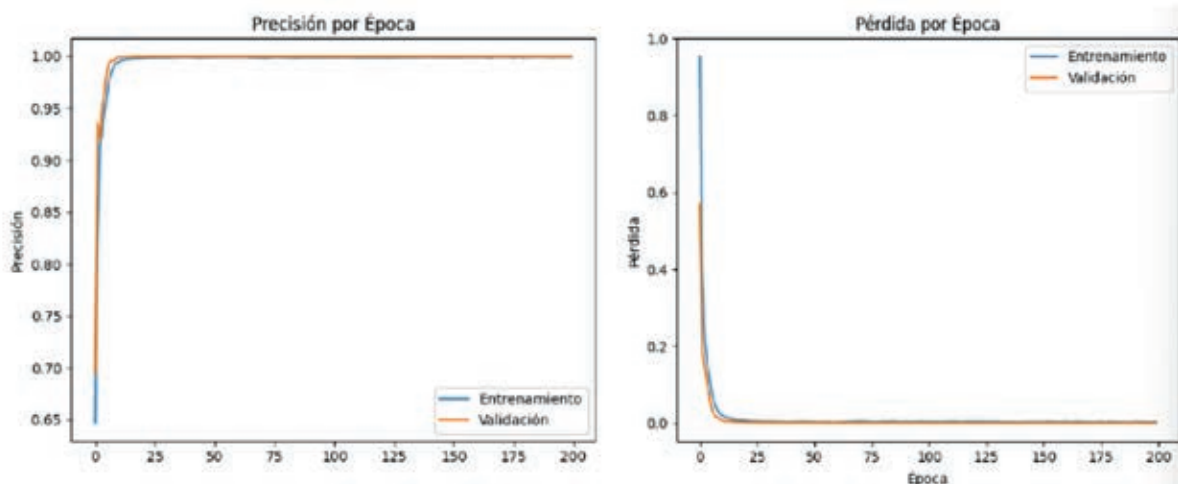
2.1.2 Curva ROC-AUC

El área bajo la curva (AUC) ROC del modelo fue de 0.982, lo que demuestra una excelente capacidad discriminativa entre tráfico normal y tráfico malicioso. Además, el modelo alcanzó una precisión en pruebas de 96.84%, confirmando su alta efectividad para identificar patrones asociados a amenazas zero-day. Para la evaluación de este modelo, se propuso una gráfica sobre precisión y pérdida (Gráfica 2) dando como resultado que el modelo responde satisfactoriamente al entrenamiento y tenemos respuestas esperadas.

GRÁFICA 2.

A) PRECISIÓN DEL ENTRENAMIENTO.

B) PÉRDIDAS DEL ENTRENAMIENTO.



2.2 Métricas de Evaluación

La Tabla 2 muestra las métricas clave para evaluar el rendimiento del sistema que reflejan un equilibrio óptimo entre la capacidad del sistema para detectar amenazas y minimizar falsos positivos. Esto es crucial en entornos empresariales, donde las interrupciones por alertas falsas pueden generar pérdidas económicas significativas.

TABLA 2.
MÉTRICAS DE EVALUACIÓN DEL MODELO

Métrica	Valor (%)
Precisión	96.84
Sensibilidad	96.5
F1-Score	96.5

2.3 Comparación con Sistemas Tradicionales

El modelo CNN-RNN demostró un rendimiento competitivo en comparación con los sistemas tradicionales. Aunque los modelos tradicionales, como Random Forest y LightGBM, lograron valores de precisión y sensibilidad superiores al 99%, el modelo CNN-RNN alcanzó un 96% de precisión, sensibilidad y F1-Score. Este desempeño destaca por su equilibrio entre las métricas, lo que lo posiciona como una solución robusta para la detección de ataques Zero-Day, sin embargo, con un margen de mejora para alcanzar niveles similares a los mejores modelos tradicionales.

TABLA 3.
COMPARATIVA CON OTROS MODELOS.

Modelo	Precisión	Sensibilidad	F1-Score
CNN-RNN	96.84%	96.5%	96.5%
Random Forest	99.5%	99.5%	99.5%
LightGBM	99.7%	99.7%	99.7%
Naive Bayes	95.0%	95.0%	95.0%

El sistema basado en aprendizaje profundo logró una tasa de falsos positivos del 0.18%, en contraste con el 12.7% reportado por los sistemas tradicionales. Aunque el procesamiento inicial de datos, como la lectura de archivos y la extracción de características, puede llevar unos 10 minutos en función del tamaño del conjunto de datos, la predicción para cada nuevo flujo de tráfico de red se realiza en un promedio de 1.2 segundos. Esta mejora en la velocidad de inferencia es crucial para aplicaciones en tiempo real, mientras que la reducción de falsos positivos minimiza las interrupciones operativas y mejora la confianza en las alertas generadas.

El uso de una matriz de confusión se utiliza para evaluar el desempeño del modelo de clasificación, que proporciona una representación visual y detallada de las predicciones realizadas por el modelo en comparación con los valores reales, por lo que utilizar esta herramienta es esencial para la obtención de los resultados.

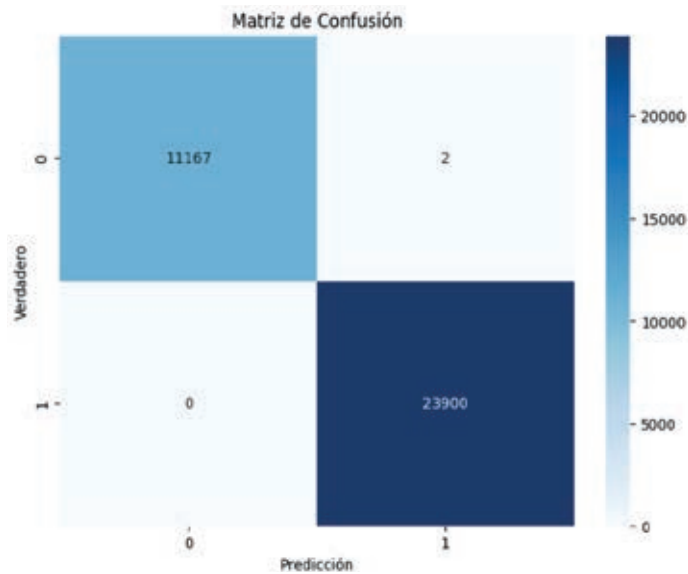


Figura 5

Matriz de Confusión.

Además de los modelos tradicionales como Random Forest y LightGBM, el modelo CNN-RNN también puede contrastarse con técnicas ampliamente utilizadas en el ámbito de la seguridad informática, como el Análisis de Conducta de Usuario (UBA) y la Detección de Tráfico Imprevisto.

El Análisis de Conducta de Usuario se basa en identificar patrones de comportamiento normales de los usuarios y detectar anomalías. Sin embargo, esta técnica tiene limitaciones cuando los ataques Zero-Day imitan comportamientos legítimos, lo que puede aumentar tanto los falsos positivos como los falsos negativos. Por otro lado, el modelo CNN-RNN no depende de patrones de comportamiento predefinidos, lo que le permite detectar características latentes en los datos que no son evidentes para técnicas basadas en comportamiento.

La Detección de Tráfico Imprevisto se centra en analizar patrones inusuales en el tráfico de red. Aunque es efectiva para detectar ciertos tipos de ataques, su desempeño se ve limitado cuando el tráfico malicioso se camufla dentro de patrones normales. En contraste, el modelo CNN-RNN puede identificar patrones complejos en los datos mediante la extracción automática de características, logrando una precisión del 96.84% y una sensibilidad del 96.5%, superando los desafíos de las técnicas mencionadas.

3 Discusión

Aunque el desarrollo e implementación del sistema basado en aprendizaje profundo para la identificación de amenazas zero-day en entornos empresariales ha generado resultados altamente prometedores que validan

su efectividad y utilidad. Este apartado analiza en profundidad los hallazgos obtenidos, su relación con investigaciones previas, las implicaciones prácticas y las limitaciones identificadas, así como las recomendaciones para mejorar y ampliar el alcance del sistema en futuros desarrollos.

El modelo propuesto alcanzó una precisión en pruebas del 96.8%, lo que refleja la alta capacidad del sistema para detectar de manera efectiva las amenazas zero-day en el tráfico de red empresarial. Además, el área bajo la curva (AUC) ROC fue de 0.982, lo que demuestra una excelente capacidad discriminativa entre tráfico normal y tráfico malicioso. Estos resultados indican que el modelo es capaz de distinguir con precisión entre los diferentes tipos de tráfico, lo que es fundamental en entornos de alta seguridad.

Comparado con sistemas tradicionales basados en firmas, que alcanzaron una precisión promedio del 96.8%, el modelo CNN-RNN demuestra una mejora significativa al identificar patrones complejos y adaptarse mejor a las amenazas emergentes. Este desempeño evidencia la ventaja de integrar técnicas avanzadas como las redes neuronales convolucionales y recurrentes en la detección de anomalías, lo que supera las limitaciones de los enfoques tradicionales.

El enfoque combinado de CNN y RNN utilizado en este proyecto ha demostrado ser efectivo para capturar tanto las características espaciales como las temporales del tráfico de red, lo que coincide con estudios previos (Sabharwal & Singhal, 2021). Estos modelos permiten identificar patrones anómalos en el tráfico con un nivel de precisión que supera a los métodos tradicionales basados en reglas y firmas.

La integración de técnicas como el análisis de correlación y la normalización de datos es coherente con enfoques modernos de preprocesamiento que optimizan el rendimiento de los modelos de aprendizaje profundo (Matus & Pérez, 2018). Este estudio contribuye al avance en la implementación práctica de estas técnicas, adaptándolas a contextos empresariales reales. El sistema desarrollado no solo mejora la detección de amenazas zero-day, sino que también fortalece la postura general de ciberseguridad de las empresas al proporcionar herramientas que:

- Facilitan la detección temprana de amenazas.
- Reducen los costos asociados con incidentes de seguridad.
- Aumentan la confianza de los clientes y socios comerciales en las capacidades de defensa de la organización.

Estas características posicionan al sistema como una solución viable y escalable para organizaciones de diversos tamaños y sectores, especialmente aquellas con altos niveles de exposición a riesgos cibernéticos. Aunque los resultados obtenidos son positivos, se identificaron limitaciones que deben ser abordadas en futuros desarrollos:

1. **Dependencia de Datos de Entrenamiento:** La calidad y representatividad de los datos utilizados para entrenar el modelo son cruciales para su rendimiento. Si los datos no reflejan adecuadamente las características de las amenazas emergentes, la capacidad del sistema para detectar anomalías podría verse comprometida.

2. **Complejidad Computacional:** Aunque el modelo alcanzó tiempos de respuesta aceptables, su complejidad computacional puede representar un desafío en entornos con recursos limitados. La optimización adicional de los algoritmos será necesaria para garantizar su aplicabilidad en infraestructuras menos avanzadas.
3. **Falsos Negativos:** Aunque la tasa de falsos negativos fue baja, sigue siendo un área crítica de mejora, ya que cualquier amenaza no detectada podría tener consecuencias graves para la organización.

Conclusiones

El sistema híbrido propuesto, basado en redes neuronales convolucionales (CNN) y recurrentes (LSTM), ha demostrado ser una solución efectiva para la detección de amenazas Zero-Day en entornos empresariales. Al alcanzar una precisión del 96.84% y un AUC de 0.982, se posiciona como una alternativa superior frente a los métodos tradicionales basados en firmas, los cuales han mostrado limitaciones ante ataques desconocidos y altamente dinámicos (Nguyen & Armitage, 2022; Smith & Taylor, 2020). Este enfoque permite detectar patrones anómalos complejos sin necesidad de reglas predefinidas, lo cual es crucial ante vulnerabilidades que aún no han sido documentadas.

El modelo no solo demuestra eficacia técnica, sino que también presenta ventajas prácticas significativas. Su diseño modular y escalable facilita la integración en diversas infraestructuras empresariales, desde pequeñas compañías hasta grandes corporativos, adaptándose a diferentes sectores y niveles de riesgo. Además, su capacidad para generar reportes precisos en tiempo real refuerza la toma de decisiones basadas en datos, una cualidad esencial en escenarios de respuesta rápida ante incidentes de seguridad (Ortiz & Ramírez, 2021).

Sin embargo, el estudio también identifica desafíos que deben ser considerados en desarrollos futuros. Entre ellos, destaca la dependencia de datos de calidad y diversidad, la carga computacional del modelo y la necesidad de seguir reduciendo la tasa de falsos negativos. Estos aspectos son críticos, ya que incluso un pequeño margen de error podría representar un riesgo considerable para los activos digitales de una organización.

Como líneas futuras, se recomienda ampliar el conjunto de datos con tráfico en tiempo real de distintos sectores, aplicar técnicas de optimización para reducir la complejidad del modelo (como redes neuronales ligeras), y vincular el sistema con herramientas de respuesta automatizada que permitan acciones inmediatas ante una alerta. Asimismo, se sugiere realizar evaluaciones longitudinales para medir el impacto del sistema en la prevención de incidentes a lo largo del tiempo.

En conclusión, este estudio valida el potencial del aprendizaje profundo como un pilar clave en la evolución de la ciberseguridad empresarial. La capacidad del modelo para adaptarse, aprender continuamente y ofrecer detección temprana refuerza su papel como herramienta estratégica frente a un panorama de amenazas en constante transformación (Sabharwal & Singhal, 2021; Cruz & Pineda, 2021). La integración de tecnologías inteligentes será fundamental para garantizar la protección de los sistemas digitales y la continuidad operativa de las organizaciones en la era moderna.

Referencias

1. Cruz, A., & Núñez, S. (2021). Redes neuronales ligeras para la optimización de sistemas de seguridad. *Revista de Matemáticas Aplicadas a la Ciberseguridad*, 4(2), 98-115.
2. Cruz, J., & Pineda, G. (2021). Detección de amenazas cibernéticas mediante aprendizaje profundo: Un enfoque práctico. *Revista Mexicana de Ciberseguridad*, 10(2), 45-63.
3. European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). (2021). Artificial intelligence for advanced threat detection: Policy recommendations. Bruselas: ENISA.
4. García, L., & Martínez, A. (2020). Métodos de detección de anomalías en tráfico de red: Comparativa entre técnicas tradicionales y modernas. *Revista Iberoamericana de Innovación Tecnológica*, 12(4), 22-40.
5. Gutiérrez, R., & Martínez, A. (2020). Implementación de aprendizaje profundo para la detección de anomalías en entornos empresariales. *Revista de Ciencias Empresariales y Cibernéticas*, 6(3), 145-160.
6. ISO/IEC. (2021). ISO/IEC 27032: Guidelines for cybersecurity. Londres: ISO/IEC.
7. Kim, S., & Park, H. (2019). Deep learning for network anomaly detection: State-of-the-art review. *Journal of Cybersecurity Strategies*, 7(1), 35-50. <https://doi.org/10.1080/00275565.2019.001023>
8. Matus, C., & Pérez, R. (2018). Modelos matemáticos aplicados a la ciberseguridad: Teoría y práctica. *Journal of Cyber Analytics*, 9(3), 55-68.
9. Muralidharan, K., & Sukhtankar, S. (2016). Enhancing cybersecurity through adaptive AI models. *Journal of Cyber Risk Management*, 14(3), 330-355.
10. Organización Internacional de Normalización (ISO). (2021). ISO 27001: Normas para la Gestión de la Seguridad de la Información. Ginebra: ISO.
11. Patel, R., & Patel, A. (2018). Enhancing cybersecurity through deep learning approaches. *International Journal of Advanced Cyber Systems*, 7(1), 28-43. <https://doi.org/10.1016/j.ijacs.2018.01.004>
12. Quesada, J., & López, R. (2020). Uso de redes neuronales convolucionales en la ciberseguridad: Casos de éxito. *Estudios en Usabilidad y Seguridad Digital*, 10(1), 30-45.
13. Rodríguez, A., & Vargas, L. (2019). Redes neuronales en la detección de ataques: Un análisis técnico. *Revista de Gestión Empresarial y Tecnológica*, 9(4), 200-219.
14. Sabharwal, S., & Singhal, R. (2021). Advancing anomaly detection with convolutional and recurrent neural networks. *Journal of Machine Learning in Security*, 16(3), 220-238. <https://doi.org/10.1108/JMLS-09-2021-004>
15. Sandoval, L., & Hernández, R. (2020). Impacto del aprendizaje profundo en la detección de ataques zero-day. *Revista Latinoamericana de Ciberseguridad*, 8(3), 88-100.
16. Smith, J., & Taylor, P. (2020). Zero-day attack detection using deep learning: Challenges and solutions. *Journal of Advanced Cybersecurity Research*, 12(4), 190-208. <https://doi.org/10.1002/jacr.2020>
17. Nguyen, T. T., & Armitage, G. (2022). Deep learning-based intrusion detection systems: A review and taxonomy. *Computer Networks*, 210, 108985. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.108985>
18. Thompson, B., & Green, A. (2019). Improving network security with anomaly-based systems. *Journal of Business Systems and Cyber Defense*, 8(4), 75-90.
19. WHO. (2021). Global challenges in cybersecurity and how AI can help. Ginebra: World Health Organization.
20. World Economic Forum (WEF). (2021). Cyber resilience in the digital age: Building proactive defense systems. Ginebra: WEF.

Fotografías

<https://www.intercam.com.mx/empresasbanca-de-empresascreditoscartera-de-credito>

Modelo de Distribución de Costos para el Agua Potable en Fraccionamientos Habitacionales Mediante Juegos Cooperativos

Guillermo López López¹
Miguel Cedeño Hernández²



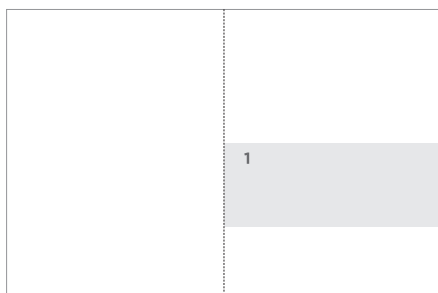
Acerca de los autores

¹ Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional.

² Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional.

Resumen

La escasez de agua es una problemática que afecta muchas zonas de la República Mexicana, en particular Nuevo León. Algunas de las causas por las que ocurre lo anterior son: falta de lluvias, cambio climático, crecimiento poblacional, desastres naturales como sismos o huracanes.



<https://www.scribd.com/document/514636707/DOPAP-seman-1-a-la-8>

En el presente trabajo, se realiza un modelo matemático basado en el proceso de construcción de una red de agua potable. El lugar elegido es la zona noreste que colinda con el área metropolitana del estado de Nuevo León. Una vez construido el modelo de red, se obtiene una distribución de costos utilizando la teoría de los juegos cooperativos, en particular mediante el valor de Shapley.

Palabras clave: Fraccionamientos habitacionales, árbol de expansión mínima, juegos cooperativos, valor de Shapley.

Abstract

Water scarcity is a critical issue affecting various regions of the Mexican Republic such as Nuevo León. Key contributing factors include insufficient rainfall, climate change, population growth, and natural disasters such as earthquakes and hurricanes.

This study develops a mathematical model based on the construction process of a potable water distribution network. The selected area is the northeastern zone bordering the metropolitan region of the state of Nuevo León. Once the network model is established, cost allocation is performed using cooperative game theory, specifically through the application of the Shapley value.

Keywords: Residential subdivisions, minimum spanning tree, cooperative games, Shapley value.

Introducción

Un juego cooperativo, es un juego en el que los jugadores tienen libertad de comunicación previa al juego para llegar a acuerdos vinculantes. Uno de estos acuerdos puede corresponder a la repartición de ganancias o de costos (Jones, 1980). Como ejemplo, considere el caso de un grupo de pequeños productores de fruta, los cuales han decidido establecer una sociedad cooperativa con el propósito de vender su producto bajo una misma marca. Una vez que se determinan las ganancias totales obtenidas por la sociedad cooperativa, surge la pregunta de cómo realizar una repartición justa de las ganancias de acuerdo con la contribución de cada productor. Esta idea puede ser aplicable en varios sectores de la administración pública en donde se requiera establecer una repartición justa de costos.

El presente trabajo plantea un modelo de proyecto, en donde se debe transportar agua potable hacia un conjunto de fraccionamientos habitacionales por medio de una red de tuberías. Si bien cada fraccionamiento puede considerar que para la conclusión del proyecto la cooperación con los fraccionamientos vecinos es lo mejor para el bienestar social, en ocasiones pueden surgir diferencias en cuanto a la cantidad económica que debe aportar cada uno de ellos para lograr la finalización del proyecto.

Para ejemplificar esto último, considere dos fraccionamientos A y B. Ambos fraccionamientos requieren de agua suministrada por la red principal de agua potable, por lo que cada fraccionamiento considera construir su propia tubería para tener acceso al servicio. El fraccionamiento A se encuentra a una distancia de 1 km., y el fraccionamiento B a una distancia de 2 km, más aún el fraccionamiento A se encuentra prácticamente en medio del camino de B hacia la fuente de agua. Si el costo de la obra es directamente

proporcional a la cantidad de tubería requerida, al fraccionamiento B le es conveniente económicamente la conexión con el fraccionamiento A, que establecer una conexión individual con la red principal. Ver Figura 1.

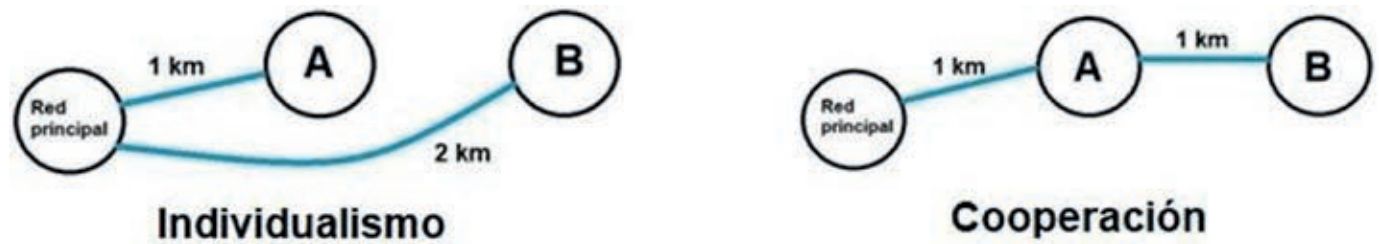


Figura 1

Fraccionamientos que requieren suministro por la red principal de agua potable.

Si ambos fraccionamientos acuerdan cooperar en la realización del proyecto, la repartición justa de costos entre ambos es un tipo de juego cooperativo llamado: juego de árbol de expansión de costo mínimo (Curiel, 1997).

1. Metodología

El lugar elegido para el desarrollo del modelo es la zona norte del país debido a su historial de sequía (González, 2022; González, 2025; Villasáes, 2025). En particular se eligió la subprovincia de Llanura y Lomeríos, ubicada en la zona noreste que colinda el área metropolitana del estado de Nuevo León, pues la demanda de vivienda en este sitio va en ascenso (Saavedra, 2022). Este lugar tiene la característica de tener una pequeña sierra baja

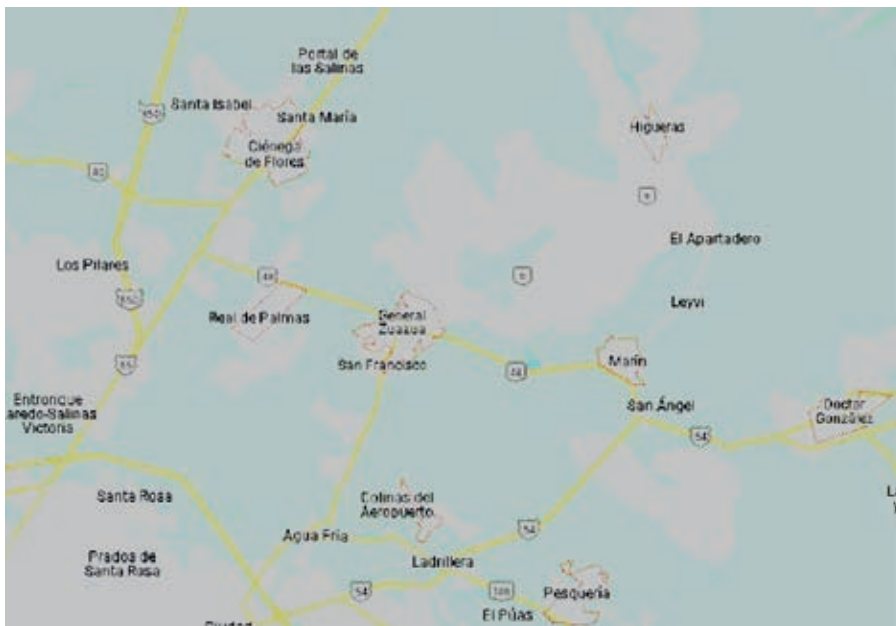


Figura 2

Fraccionamientos en la subprovincia de Llanura y Lomeríos.

Fuente: Google Maps.

(Las Mitras), lomeríos suaves con bajadas y llanuras de extensión. Los suelos contienen un alto nivel de arcilla, al igual que son profundos y de color oscuro. El clima predominante es semicálido subhúmedo con lluvias en verano, cubriendo una superficie estatal del 9.11% (Contreras, 2007). Para el modelo se eligieron 8 fraccionamientos en esta subprovincia, los cuales son: Ciénegas de Flores, Higuera, Real de Palmas, General Zuazua, Marín, Doctor González, Colinas del Aeropuerto y Pesquería. Su posición geográfica se muestra en la Figura 2.

En la teoría de juegos, un juego cooperativo de n -jugadores es descrito por su función característica v , la cual es una función real-valuada cuyo dominio se toma sobre el conjunto de todos los subconjuntos de jugadores (Owen, 1995). Por ejemplo, si se tienen n jugadores, entonces es posible conformar 2^n subconjuntos distintos de jugadores, incluyendo al conjunto vacío. En el modelo, cada fraccionamiento es un jugador, por tanto, es un juego de 8 jugadores; y cada punto de dominio de la función característica v representará el costo de llevar a cabo un subproyecto de transportar agua potable por medio de una red de tuberías, para un subconjunto de fraccionamientos específico. Hacer esto para cada uno de los $2^8 = 256$ subconjuntos posibles de estos 8 fraccionamientos, describe en su totalidad a la función v .

El siguiente paso es determinar el costo de realización de cada uno de estos 256 subproyectos. Cada uno de ellos corresponde a un problema de optimización de recursos, en donde se debe mantener la conectividad de la red de fraccionamientos, pero procurando que esta se realice al mínimo costo, es decir, gastar lo menos posible en obra pública. Dentro de la teoría de gráficas, este problema de optimización es conocido como problema del árbol de expansión mínima (Johnsonbaugh, 2005), y dos algoritmos para determinar su solución son el algoritmo de Prim y el algoritmo de Kruskal (Chartrand y Zhang, 2012; Kolman *et al.*, 1997; Grimaldi, 1998). Por tanto, determinar cada punto de la función v , es equivalente a determinar el árbol de expansión mínima de cada subconjunto posible de fraccionamientos.

En particular, para determinar el costo en obra pública de conectar dos fraccionamientos cualesquiera, se han considerado catálogos oficiales (Comisión Nacional del Agua, 2023) para la construcción de sistemas de agua potable, con los procesos y materiales necesarios y tomando en cuenta las siguientes características:

- Primero. Para la distribución de agua, se considera la tubería de polietileno de alta densidad debido a sus propiedades y características con relación a la distribución de agua potable.
- Segundo. Para el diámetro de la tubería en cada conexión, se ha utilizado un criterio propio consistente en el promedio de diámetros existentes en puntos estratégicos. Si el resultado es una cantidad inexistente para el catálogo de precios, se elige el valor mínimo y cercano a una existente, en caso contrario, se elige el valor como diámetro de la tubería para la respectiva conexión.
- Tercero. Para el tipo de terreno, se proyectó considerar la ruptura de pavimento, desmonte, limpieza del terreno, excavación, colocación de plantilla y relleno. Se han tomado en cuenta cuatro tipos de terreno para la excavación: montes en regiones áridas o semiáridas, roca fija (área alta), pavimento asfáltico y áreas con presencia de agua (ríos, canales y arroyos).

2. Resultados

Para la realización de la conexión de dos fraccionamientos, se consideraron características como: distancias cortas (si es posible), evitar demasiados cambios de ángulos o zigzags, y no cruzar terrenos con construcciones previas, ya sean públicas o privadas (escuelas, fábricas, lugares recreativos, etcétera). Para lograr lo anterior, se realizó un estudio de los planos de tuberías existentes de cada fraccionamiento habitacional,¹ para conocer el diámetro de la tubería existente en cada lugar. Se utilizó un mapa topográfico del lugar para identificar las áreas altas.² Además, se han utilizado planos de pavimento y de ríos, canales o arroyos. Esto ha reducido las posibles conexiones entre pares de fraccionamientos a solo 13, pues cualquier otra conexión es inviable.

A modo de ejemplo, la Tabla 1 muestra los costos resultantes para la conexión del fraccionamiento de General Zuazua con el fraccionamiento Marín. Un análisis detallado y exhaustivo de la obtención de estos datos para cada conexión, puede encontrarse en (López-López, 2024). La Tabla 2 indica las 13 conexiones a pares, su distancia y el costo total. Tome en cuenta que estas son simétricas, es decir la distancia y costo de la conexión (X,Y) son los mismos que para (Y,X) , por lo que solo se muestra explícitamente una de ellas. La Figura 3 muestra la gráfica resultante.

TABLA 1.
COSTOS PARA LA CONEXIÓN DEL FRACCIONAMIENTO DE GENERAL ZUAZUA CON EL FRACCIONAMIENTO MARÍN.

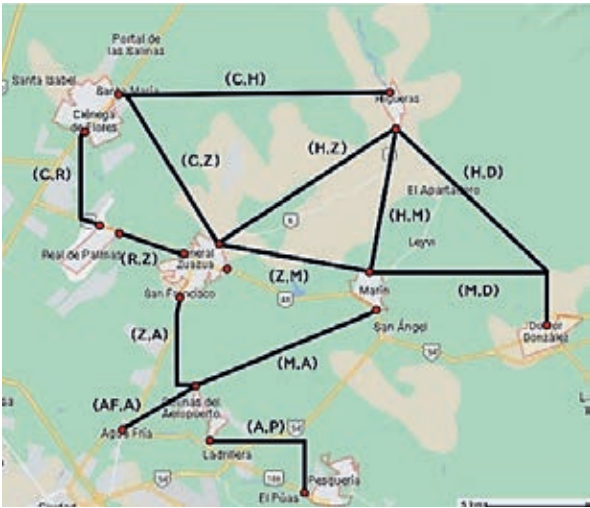
Concepto	Unidad	Cantidad	Precio Unitario \$	Importe \$
Ruptura de pavimento	m ³	0.00	334.97	0.00
Limpia de terreno	ha	1.50	10,914.23	16,371.25
Excavación en cualquier material	m ³	2,546.06	157.45	400,877.15
Excavación en roca fija	m ³	0.00	350.21	0.00
Excavación en presencia de agua	m ³	336.00	263.16	88,421.76
Platilla apisonada	m ³	419.95	143.37	60,208.23
Tubo de 6" de diámetro	m	7,622.69	23.39	178,294.72
Relleno de zanjas	m ³	2,327.40	20.09	46,757.47
Construcción en pavimento	m ³	0.00	402.64	0.00
Costo Total				790,930.67

TABLA 2.
 COSTO DE LAS RESTANTES CONEXIONES ENTRE FRACCIONAMIENTOS.

Abrev.	Fraccionamiento	Conexión	Distancia (km.)	Costo Total
C	Ciénega de Flores	(C, H)	13.00	1'574,149.59
		(C, R)	5.50	1'508,365.03
		(C, Z)	9.06	1'880,101.48
H	Higueras	(H, Z)	10.25	1'751,344.30
		(H, M)	6.93	522,751.94
		(H, D)	10.18	1'037,332.09
R	Real de Palmas	(R, Z)	3.37	1'629,318.88
Z	General Zuazua	(Z, M)	7.62	790,930.67
		(Z, A)	5.43	785,651.83
M	Marín	(M, D)	11.12	1'003,818.96
		(M, A)	9.56	1'023,454.59
D	Doctor González		0.00	
A	Colinas del Aeropuerto	(A, P)	7.06	1'597,788.71
P	Pesquería		0.00	
AF	Agua Fría (Red principal)	(AF, A)	4.06	1'153,647.92

Figura 3

Posibles conexiones entre pares de fraccionamientos.



Retomando el modelo, el siguiente paso es la construcción de la función característica ¹⁷, determinando el árbol de expansión mínima para cada subconjunto de fraccionamientos posible. Sin embargo, visto cada uno de los árboles de expansión mínima como un proyecto de obra pública,

y dado que se ha comentado que solo son posibles 13 conexiones a pares entre fraccionamientos, resulta que no todos los árboles son realizables por lo que el correspondiente valor en la función característica será 0. La determinación total del contradominio de la función característica φ para los 256 puntos de su dominio en el presente modelo, pueden encontrarse en (López-López, 2024).

A modo de ejemplo, la Figura 4 muestra el árbol de expansión mínima de la gran coalición (Morris, 1994) conformada por todos los jugadores, en este caso los 8 fraccionamientos participantes. La conexión entre Colinas del Aeropuerto y Agua Fria se ha descartado, ya que los fraccionamientos de Pesquería y Colinas del Aeropuerto ya cuentan cada uno de ellos con una conexión directa a la red principal de aguas. El costo estimado del proyecto de \$7'783,456.73.

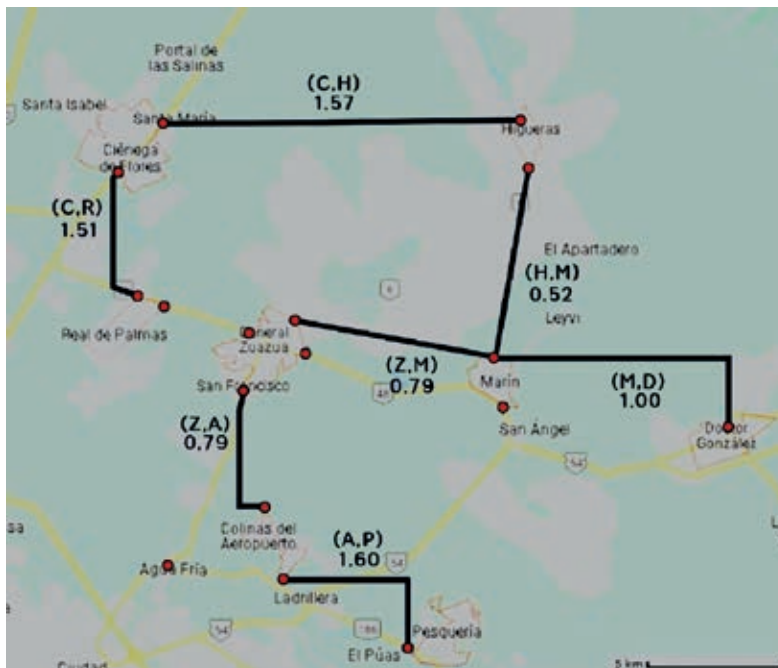


Figura 2

Árbol de expansión mínima considerando todos los fraccionamientos.

Finalmente, para determinar la repartición justa de los \$7'783,456.73 del costo de la obra pública entre los 8 fraccionamientos, se utiliza como método de solución del juego cooperativo, el valor de Shapley. Este método de solución es descrito como un índice de poder, utilizado en política para determinar la fuerza que puede tener una coalición de partidos políticos o coalición parlamentaria para aprobar una ley en parlamento (Straffin, 1993). Su ventaja respecto a otros métodos de solución como el núcleo, es que este determina un vector de solución único, en vez de un posible conjunto de soluciones (Thomas, 1986; Pérez *et al.* 2004).

El valor de Shapley φ_i para el jugador i -ésimo, en un juego cooperativo de n jugadores, se define por la expresión (Winston, 2005),

$$\varphi_i = \sum \frac{|S|!(n - |S| - 1)!}{n!} [v(S \cup \{i\}) - v(S)],$$

en donde la sumatoria se realiza sobre el conjunto de coaliciones S que no tienen al jugador i como integrante. En nuestro modelo $n = 8$, que corresponde a la cantidad de fraccionamientos que son parte del proyecto. Por otra parte, para este momento ya se ha determinado el valor de la función característica v en cada uno de los 256 puntos de su dominio; sin embargo, para determinar el valor ϕ_i es recomendable utilizar equipo de cómputo. Particularmente Python (Awan, 2024) es una opción eficiente para ello.

La Tabla 3 muestra las cantidades obtenidas para cada jugador, es decir el costo en obra pública que tendría que aportar cada fraccionamiento para el proyecto de obra pública de la red de agua potable descrito como el árbol de expansión mínima de la Figura 4.

TABLA 3.
APORTACIÓN DE CADA FRACCIONAMIENTO AL PROYECTO.

Fraccionamiento	Costo por Construcción	Fraccionamiento	Costo por Construcción
Ciénaga de Flores	\$1'471,488.86	Marín	\$1'099,669.02
Higueras	\$1'097,489.61	Doctor González	\$540,617.85
Real de Palmas	\$781,856.52	Colinas del Aeropuerto	\$1'130,921.07
General Zuazua	\$833,204.78	Pesquería	\$828,209.02
Costo Total			\$7'783,456.73

Conclusiones

Tras realizar investigaciones, búsqueda de información, toma de datos esenciales, creación de herramientas y usar criterios para la construcción de sistemas, se concluye que el modelo matemático propuesto cumple con el objetivo de poder ser utilizado como forma alternativa de análisis y apoyo en la elaboración de un sistema de agua potable en donde se requiera de una repartición de costos, que si bien no es equitativa, si se considera justa en función de la contribución al costo que genera cada uno de los jugadores.

Sin embargo, se debe tener presente que, al ser un modelo matemático en fase de planeación, se han omitido conceptos de la ingeniería civil que pueden modificar las dimensiones de excavación, criterios de construcción, normativas y costos. Entre los conceptos que podrían modificar las dimensiones son los ángulos de inclinación, la batimetría del área y características de la tubería. En el aspecto económico, algunos conceptos que pueden modificar el importe del sistema son los precios unitarios, sueldos, equipo de trabajo, entre otros; aunque en este caso, solo se usan costos por la construcción. Por otra parte, se utiliza un catálogo de la CONAGUA, donde los costos podrían ser distintos a los que tendrían los Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D., pero esta institución no cuenta con un catálogo propio, simplemente se usan modalidades de adjudicación de contrato en la obra por Ley de Egresos para el ejercicio Fiscal.

Referencias

- Awan A. A. (2024, 13 de marzo). Una interpretación a los valores SHAP y a la interpretabilidad del machine learning. Datacamp. <https://www.datacamp.com/es/tutorial/introduction-to-shap-values-machine-learning-interpretability>
- Chartrand G., Zhang P. (2012). *A first course in graph theory*. Dover Publications.
- Contreras Delgado, C. (2007). *Geografía de Nuevo León*. Fondo Editorial de Nuevo León.
- Comisión Nacional del Agua. Catálogo General de Precios Unitarios Para la Construcción de Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Gerencia de Estudio y Proyectos de Agua Potable y Redes de Alcantarillado. 2023.
- Curiel I. (1997). *Cooperative game theory and applications*. Kluwer Academic Publishers.
- González, D. (2025, marzo 25). *Persistirá sequía en zona norte del país, señala especialista*. La Jornada. <https://www.jornada.com.mx/noticia/2025/03/25/sociedad/persistira-sequia-en-zona-norte-y-noroeste-del-pais-senala-especialista>
- González, M. (2022, agosto 1). *4 factores que explican la histórica sequía que afecta al norte de México (y cuánto puede durar)*. BBC News. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-62359729>
- Grimaldi R. P. (1998). *Matemáticas discreta y combinatoria*. Pearson Prentice Hall.
- Kolman B., Busby R. C., Ross S. (1997). *Estructuras de matemáticas discretas para la computación*. Pearson.
- Johnsonbaugh R. (2005). *Matemáticas discretas* (6ta edición). Pearson Prentice Hall.
- Jones A. J. (1980). *Game theory: Mathematical models of conflict*. Ellis Horwood Limited.
- López-López G. (2024). *Modelo de repartición de costos en la distribución de agua potable en fraccionamientos habitacionales en la zona noreste del área metropolitana de Nuevo León mediante juegos cooperativos* [Tesis de licenciatura no publicada]. Instituto Politécnico Nacional.
- Morris P. (1994). *Introduction to game theory*. Springer.

Owen G. (1995). *Game Theory*, 3rd. Edition. Academic Press.

Pérez-Navarro J., Jimeno-Pastor J. L., Cerdá-Tena E. (2004). *Teoría de juegos*. Prentice Hall.

Saavedra, O. (2022, marzo 7). *La falta de agua en Monterrey amenaza al sector inmobiliario que va en apogeo*. Obras por Expansión. <https://obras.expansion.mx/inmobiliario/2022/06/07/falta-de-agua-en-monterrey-amenaza-al-sector-inmobiliario>

Straffin P. D. (1993). *Game theory and strategy*. The Mathematical Association of America.

Thomas L. C. (1986). *Games, theory and applications*. Dover Publications.

Villasáes, J. (2025, marzo 21). *Pega la sequía a 11 municipios del norte de NL*. El Norte. <https://www.elnorte.com/pega-la-sequia-a-11-municipios-del-norte-de-nl/ar2973963>

Winston W. L. (2005). *Investigación de operaciones: Aplicaciones y algoritmos*. Cengage Learning.

Fotografías

<https://www.scribd.com/document/514636707/DOPAP-seman-1-a-la-8>

Impacto del Embalaje del Transporte de Carga en el Consumo Energético y Cambio Climático

Enrique de Jesús Mohedano Torres¹, Lesly Anahí Barrera Pacheco², Yanet Hernández Ortega³ y Elizabeth Barrera Rodríguez⁴.



Resumen

Acerca de los autores

^{1,2,3} Tecnológico Nacional de México Campus Pachuca, Pachuca de Soto, Hgo, México.

⁴ Tecnológico Nacional de México Campus Occidente del Estado de Hidalgo, Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo.

México tiene un gran interés por los productos verdes, en su elaboración, servicio o traslado, estudios muestran que el 50% de los consumidores prefieren productos verdes. Lo que representa un mercado importante para incursionar, sin embargo, se carece de políticas para regular la producción y el consumo de estos. En este sentido, el problema es el dióxido de carbono (CO₂) que es el principal gas emitido durante la producción de papel y cartón necesario para el embalaje.

Aunado a esto, está el sentido de llevar la mercancía mediante el problema de las rutas de vehículos (VRP), que optimiza el recorrido y permite un ahorro en consumo energético. Su derivado El Problema de Rutas de Vehículos Verdes (G-VRP) es una solución alternativa para mitigar el consumo de energía con rutas verdes. Por lo tanto, el objetivo es hacer una revisión literaria de los embalajes con eco- etiquetas y el G-VRP.

Palabras clave: Embalaje, Ecoetiquetas, Productos verdes, Dióxido de Carbono, G-VRP.

Abstract

Mexico has a strong interest in green products, whether in their production, service, or transportation. Studies show that 50% of consumers prefer green products. This represents an important market to enter, however, there is a lack of policies to regulate their production and consumption. In this regard, the problem is carbon dioxide (CO₂), which is the main gas emitted during the production of paper and cardboard needed for packaging.

Additionally, there is the rationale for transporting goods using the vehicle routing problem (VRP), which optimizes the route and allows for energy savings. Its derivative, the Green Vehicle Routing Problem (G-VRP), is an alternative solution to mitigate energy consumption with green routes. Therefore, the objective is to conduct a literary review of eco-labeled packaging and the G-VRP.

Keywords: Packaging, Ecolabels, Green products, Carbon dioxide, G-VRP.

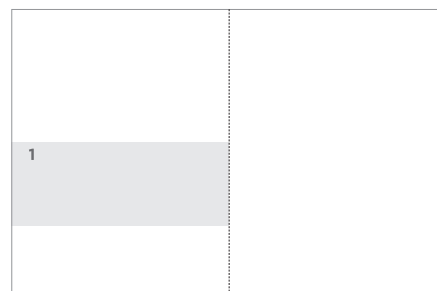
Introducción

En los últimos años, la eficiencia energética ha ganado prominencia en la agenda pública debido al aumento en los costos de los combustibles fósiles, la preocupación creciente por el cambio climático y los desafíos en el suministro de energía. Estos factores han impulsado la urgencia de optimizar el uso de la energía y fomentar prácticas más sostenibles en todos los sectores.

La actualidad energética y ambiental brinda una valiosa oportunidad en el sector del transporte, el cual ejerce un considerable impacto en el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero, situándolo en el centro de las transformaciones necesarias. Las actividades del transporte (aéreo, terrestre y marítimo), que consumen principalmente gasolinas y diésel, registraron una tasa de crecimiento anual de 2.45% en el periodo 1990-2015, y en este último año emitieron 171.3 millones de toneladas de CO₂, lo que representa 24.5% de las emisiones totales (INECC, 2018).

En este sentido, dos sectores de gran importancia en la emisión de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) son las industrias de energía y transporte. Las trayectorias de las variables indican una gran correlación entre la tendencia del consumo de energía no renovable y las emisiones, en tanto que las energías renovables muestran un ligero descenso. Específicamente, se espera un crecimiento anual del 2.8% en el transporte por carretera en países en desarrollo hasta el año 2030.

En el transporte de carga (TCC), la mayor parte del consumo de energía proviene del petróleo. Por ende, analizar la eficiencia energética en este sector implica examinar varios aspectos, como la distribución modal, la



<https://www.infobae.com/movant/2025/03/19/el-impacto-de-la-logistica-en-el-medio-ambiente-desafios-y-soluciones-sostenibles/>

estructura industrial, el marco regulatorio, las capacidades de gestión y la adopción de tecnologías. Mejorar la eficiencia energética en el TCC puede resultar en mejoras directas en la rentabilidad económica, lo que justifica su implementación.

Para el TCC, la conservación de energía no debería percibirse como una imposición o sacrificio, sino como una oportunidad genuina para mejorar la productividad y la competitividad de las empresas debido a que en la actualidad la gestión logística se desarrolla a un ritmo acelerado, ocasionando que las empresas especializadas en brindar servicios logísticos trabajan considerando la importancia de gestionar localizaciones de clientes y el uso de los medios e insumos necesarios para realizar la distribución física de las mercancías (Singh & Verma, 2018; Acosta, 2019).

Por lo anterior, esta investigación entiende a la entrega de mercancías como una actividad de carácter estratégico con el objetivo de generar ventaja ante la competencia, ya que el costo de transporte en el movimiento de carga puede absorber entre uno y dos tercios del costo logístico total de una empresa, por lo que, una gestión adecuada de la cadena puede reflejar un costo más bajo de las operaciones, una mejor planificación y flujo de información y de productos (Ballou, 2007; Gómez, Zuluaga, Ceballos & Jiménez, 2019) aunado a la reducción de consumo energético y costos. De acuerdo Wandosell *et al.* (2021) acompañado al movimiento de mercancía una de las estrategias del marketing verde para las empresas es el uso de envases eco amigables con el medio ambiente.

Por tanto, el problema actual, es que el 99 % de vehículos pesados en México operan con diésel. En promedio los autobuses tipo B2 de 19 t, los cuales son vehículos más usados para el transporte de pasajeros en la ciudad, consumen 22,72 L/100 km y emiten 777 gCO₂/km. Similarmente, los vehículos tipo tractocamión (T3), de 54 t, son los más usados para el transporte de carga de larga distancia. Estos consumen en promedio 40,2 L/100 km y emiten 1063 gCO₂/km. Estos resultados son similares a los reportados en otros estudios similares realizados en diferentes partes del mundo cuando se presentan en función del peso total del vehículo.

En México, pocos vehículos (< 1%) operan con gas natural vehicular (GNV) o electricidad. Los vehículos pesados que operan con GNV se han usado para el transporte de carga y de pasajeros mostrando consumos excesivos con respecto a lo esperado. Los vehículos pesados eléctricos que operan en México se han usado para el transporte de pasajeros en las principales ciudades. Estos reducen un 40 % el consumo energético y de emisiones de GEI (Serrano, Huertas, Mogro, & Quiram, 2023).

En este sentido, los empaques y envases son indispensables para preservar, conservar y proteger la calidad de los alimentos, facilitando el transporte y comercialización de estos, sin embargo, estos materiales han generado daños perjudiciales, provocando una nueva tendencia de consumo ecológico con contenedores que mantengan e inclusive mejoren la calidad del producto envasado, teniendo en cuenta que sean seguros para la vida y salud (Kozłowicz *et al.*, 2019).

1. Metodología

Actualmente, las organizaciones buscan activamente alternativas para superar los desafíos en entornos competitivos. Cada entidad debe personalizar sus

procesos para satisfacer las demandas de los mercados elegidos (N. Rezaei, S. Ebrahimnejad, A. Moosavi, & A. Nikfarjam, 2019), al mismo tiempo que diseña estrategias para reducir el consumo de energía. En consecuencia, debido a la naturaleza compleja de los sistemas de distribución, que atienden a una amplia gama de productos que requieren flexibilidad, son intrínsecamente complejos. El paradigma logístico contemporáneo integra actividades dentro de un sistema, lo que resulta en complejidad. El objetivo principal es garantizar un flujo continuo de productos que cumplan con los requisitos de los clientes en términos de calidad y asequibilidad (J. Chen, & T. Wu, 2006), minimizando, al mismo tiempo, el uso de energía y el impacto ambiental para fomentar la sostenibilidad.

El problema de rutas de vehículos ecológicos (G-VRP) es una extensión del problema de rutas de vehículos convencionales (VRP) que desempeña un papel crucial a la hora de facilitar un flujo eficiente de productos. Garantiza altos estándares de servicio al cliente y al mismo tiempo optimiza la utilización de recursos en las operaciones de distribución al permitir la entrega, la recolección simultánea y la reducción del consumo de energía (S. Nah, S. Doreen, J. Fong, W. Shiang, & K. Leng, 2020).

Por tanto, esta investigación es una revisión literaria para abordar una estrategia de distribución verde el G-VRP, combinada con una estrategia ecológica para los embalajes, la eco etiqueta, que en suma buscan disminuir la contaminación ambiental y el consumo energético. Por su lado, las eco-etiquetas son símbolos que se otorgan a aquellos productos que tienen un menor impacto sobre el ambiente, debido a que cumple con una serie de criterios ecológicos, que considera su análisis de ciclo de vida y otras características más puntuales (S. Aguilar & M. Hernández, 2010).

Las eco-etiquetas nacen de la creciente demanda global de proteger el medio ambiente por parte de los gobiernos, de las empresas y del público en general. Existe una clasificación general de eco etiquetado de acuerdo ISO 14000 sus características se mencionan a continuación en tabla 1.

TABLA 1.
CARACTERÍSTICAS DE NORMA 14000 EN ECO-ETIQUETAS

Norma	Características
ISO 14024, Etiqueta tipo I	Son elaboradas por una tercera persona, poseen mayor credibilidad que el tipo II
ISO 14021, Etiqueta tipo II	Las elaboran las mismas empresas, son un requisito para dar a conocer que los productos que se están comercializando son amigables con el medio ambiente.
ISO 14025, Etiqueta tipo III	Para la obtención de este tipo de eco etiquetado es necesario elaborar un ACV (Análisis de ciclo de vida), cuenta con mayor credibilidad, pero la etiqueta resulta más difícil de comprender debido a que contiene una considerable información técnica

Fuente: Elaboración propia con datos en Martínez-Rodríguez, María Concepción, Mayorga-Pérez, Omar, Vera-Martínez, Martin Cutberto, & García-Morales, María Isabel. (2018).

En combinación con el uso de embalajes verdes de acuerdo a la norma ISO 14000 y una distribución verde con el G-VRP, se busca reducir el impacto generado en dos situaciones: el uso del cartón y plástico para embalajes en el transporte de carga y la distribución de este bien mediante rutas verdes. Teniendo así la siguiente contribución: Un algoritmo que permita establecer las rutas donde el combustible puede ser alternativo y no fósil, sumando con esto el uso del embalaje ecológico en su manipulación de un punto de origen a un destino.

Para lograr los objetivos del G-VRP, un enfoque implica el uso de vehículos ecológicos (EFV). Estos EFV pueden funcionar con fuentes de combustible alternativas y ecológicas, como biodiesel, electricidad, etanol, hidrógeno, metanol y gas natural, que pueden reemplazar a los vehículos con motor de combustión interna (ICEV). Esto ha llevado a la adopción de combustibles alternativos en VRP, clasificando los vehículos propulsados por combustibles alternativos (AFV) como una categoría general de EFV.

La Figura 1 muestra cómo algunos estudios en la literatura han enmarcado el Problema de Rutas de Vehículos de Combustible Alternativo (AF-VRP) sin especificar el tipo de combustible del vehículo. Vale la pena señalar que los vehículos eléctricos (EV) y los vehículos híbridos (HV) se han considerado tipos especializados de AFV y se han examinado por separado debido a sus distintas características. Los vehículos eléctricos se han considerado una alternativa ideal a los ICEV para carga distribución en muchos estudios debido a sus cero emisiones durante el uso y su mínima contaminación acústica (E. Ghorbani, M. Alinaghian, G. Gharehpetian, S. Mohammadi, S., & G. Perboli, 2020).

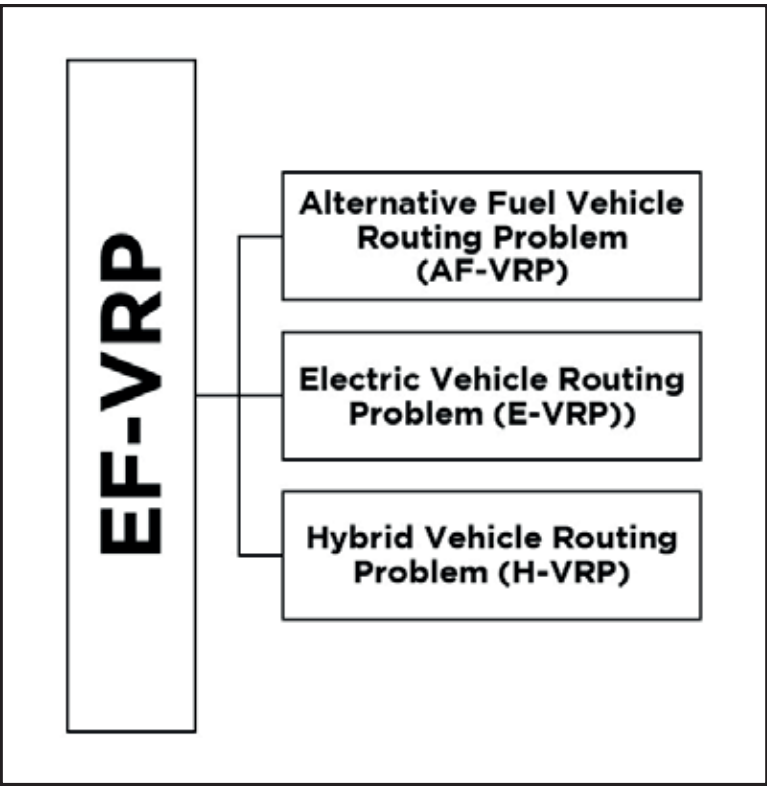


Figura 1

Variantes del problema de generación de rutas para vehículos ecológicos.

Fuente: Elaboración propia con base en Ghorbani, (2020).

2. Resultados

I. G-VRP con vehículos convencionales

S. Sabet, F. Namdarpour, & M. Mesbah. (2021), clasifica la literatura sobre G-VRP en tres dominios principales: A. Rauniar, R. Nath, P. K. Muhuri, (2019), G-VRP con vehículos convencionales, D. Pecin, A. Pessoa, M. Poggi, E. Uchoa, (2017) G-VRP con vehículos de combustible alternativo y D. Singh, & A. Verma, (2018), G-VRP con una flota mixta de vehículos.

La primera categoría incluye estudios que se centran en investigaciones convencionales de G-VRP multiobjetivo, donde el CVRP (restricción de capacidad del vehículo) considera múltiples objetivos. E. Demir, T. Bekta & G. Laporte. (2012), “introdujo inicialmente este enfoque. Los investigadores abordaron el problema bio-objetivo de la ruta de la contaminación (PRP), con el objetivo de minimizar el consumo de combustible y el tiempo del conductor. Varios académicos han ampliado la metodología de Demir para abordar el VRP, incluido A. Rauniar, R. Nath, P. K. Muhuri, (2019). G. Poonthalir, R. Nadarajan, (2018), abordaron un problema multiobjetivo con restricciones de velocidad.

Varios estudios han explorado múltiples objetivos en el ámbito de los vehículos convencionales, con el objetivo de minimizar factores como el coste marginal, el consumo de combustible y el tiempo de viaje, a menudo combinados con otras variantes. Por ejemplo, L. Alfaseeh, S. Djavadian, R. Tu, B. Farooq, M. Hatzopoulou (2019) y S. Djavadian, R. Tu, B. Farooq, M. Hatzopoulou (2020), integraron la conectividad y la automatización en su exploración multiobjetivo de rutas ecológicas.

Varios artículos han abordado limitaciones como las condiciones de las carreteras, la congestión, la topografía, la carga de los vehículos y sus impactos en el costo de la ruta y el consumo de combustible. N. Rezaei, S. Ebrahimnejad, A. Moosavi, & A. Nikfarjam, (2019) examinaron el problema de generación de rutas de vehículos ecológicos con ventanas de tiempo, considerando una flota heterogénea de vehículos y estaciones de servicio.

II.- G-VRP con vehículos de combustible alternativo

La segunda categoría es el problema de rutas de vehículos de combustible alternativo (AFVRP), que se divide en seis categorías según el tipo de combustible, como se muestra en la Figura 2. En un estudio reciente, M. Keskin, B. Catay, G. Laporte. (2021), se abordaron los tiempos de espera estocásticos en las estaciones de carga dentro de ventanas de tiempo específicas.

Otra contribución significativa fue realizada por M. Schneider, A. Stenger, D. Goeke. (2014), quien propuso una heurística híbrida que combina un algoritmo de búsqueda con una heurística de búsqueda tabú. Este enfoque tiene en cuenta las capacidades limitadas de carga de vehículos y los requisitos del cliente.

En un estudio de caso paralelo, N. Ding, R. Batta, & C. Kwon. (2015), desarrolló un enfoque heurístico que incorporaba un tiempo de carga simple para generar una solución más eficiente. H. Mao, J. Shi, Y. Zhou, & G. Zhang, (2020), por otro lado, utilizó un algoritmo mejorado de optimización de colonias de hormigas (ACO) hibridado con búsqueda local mejorada y heurísticas de inserción para abordar el problema, con un enfoque particular en la recarga parcial y

Biodiesel	Electrical	Ethanol	Hydrogen	Natural gas	Propane
Diesel vehicles	Hybrids and Plug In vehicles	Flexible fuel vehicles	Full cell vehicles	Natural gas vehicles	Propane vehicles

Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 2

Clasificación de vehículos con combustible alternativo.

el intercambio de baterías. M. Keskin, B. Catay, & G. Laporte. (2021), llevaron a cabo una investigación práctica sobre el EVRPTW-PR, implementando la recarga completa como una restricción y permitiendo al mismo tiempo la recarga parcial.

Este concepto consiste en recargar completamente un vehículo cada vez que visita una estación de servicio, permitiéndole continuar su servicio mientras su batería lo permita. M. Meng, & Y. Ma. (2020), exploraron rutas de vehículos eléctricos con ventanas de tiempo y propusieron dos estrategias de reabastecimiento de combustible. Además, S. Huang, L. He, Y. Gu, K. Wood, & S. Benjaafar, (2014) investigó el diseño de estaciones de carga móviles. M. Wen, G. Laporte, O. B. G. Madsen, A. V. Nørrelund, & A. Olsen. (2014). abordó la cuestión de la ubicación de estaciones de servicio electrónicas para vehículos eléctricos dentro de una red de tráfico para optimizar el rendimiento de la red. F. Baouche, R. Trigui, R. Billot, & N. E. El Faouzi. (2014), introdujo un enfoque novedoso al problema de las rutas de los vehículos eléctricos, incorporando etapas de carga a lo largo de la carretera en las estaciones de carga disponibles para mitigar las limitaciones de alcance.

III. G-VRP con una flota heterogénea

En el contexto de la tercera categoría, Z. Yi, J. Smart, & M. Shirk (2018), modeló y resolvió por primera vez una variante de G-VRP con una flota heterogénea. Descubrieron que emplear una flota heterogénea tiene ventajas sobre una mixta en áreas urbanas. Sumado al uso del transporte verde se encuentran los siguientes para eco etiquetas.

TABLA 2.
TIPOS DE ECO-ETIQUETAS

¿Qué nos indica?	Logotipo
ESR (Empresa Socialmente Responsable). Como su nombre nos indica al ver este logotipo en los productos nos indica que la empresa cuenta con responsabilidad social empresarial, este término es definido como el compromiso consciente y congruente de cumplir integralmente con la finalidad de la empresa, tanto en lo interno como en lo externo, considerando las expectativas económicas, sociales y ambientales de todos sus participantes, demostrando respeto por la gente, los valores éticos, la comunidad y el medio ambiente, contribuyendo así a la construcción del bien común. ⁷	
FSC (Forest Stewardship Council). Perteneciente a una asociación Internacional formada por representantes de la industria de la madera, propietarios forestales, grupos indígenas y ONG, y nos hace mención de que la madera proviene de explotaciones sostenibles.	
Distintivo de calidad Ambiental del departamento de Cataluña. Perteneciente a la región de Cataluña nos menciona las características que deben cumplir diversos tipos de productos, como si estos productos provienen de un material reciclado, o que si en su elaboración se utilizó algún tipo de sistema que favoreció el ahorro del agua, etc.	
Eco etiqueta de la Unión Europea. Esta etiqueta la crea la unión europea y es un tipo de etiqueta que nos hace mención de las características que deben cumplir diversos productos y servicios para que puedan ser considerados como amigables para el medio ambiente.	
Ángel Azul, de Alemania. Fue la primera eco etiqueta creada para otorgarse sólo a aquellos productos que tenían el menor impacto sobre el medio ambiente.	
Cisne Blanco, de los países escandinavos. Se creó este tipo de etiqueta después de haberse creado la etiqueta del Blaue Engel en Alemania, y tiene también mucha aceptación en Europa.	
Elección Ambiental, de Canadá. Etiqueta desarrollada por el gobierno de Canadá, la cual abarca una gran cantidad de productos, material reciclado, pinturas, materias primas, etc.	

Fuente: elaboración propia con datos en Martínez-Rodríguez, María Concepción, Mayorga-Pérez, Omar, Vera-Martínez, Martin Cutberto, & García-Morales, María Isabel. (2018).

Por tanto, el eco-etiquetado no es un proceso simple de obtener en el transbordo de ya que demanda una reestructuración de los procesos productivos, así de una nueva forma de repensar de qué forma las materias primas son utilizadas, además de la disposición final de los productos en combinación con el G-VRP.

Conclusiones

La revisión de la literatura analiza las características y limitaciones del G-VRP, destacando su potencial para reducir el consumo de energía. Sin embargo, también revela una brecha significativa en el diseño de rutas, particularmente en áreas como la ubicación de los depósitos de reabastecimiento de combustible, las decisiones operativas, la utilización de vehículos de combustible alternativo y los intervalos de reabastecimiento de combustible para combustibles alternativos. En suma, con un embalaje verde como medio para transportar y proteger el bien, se complica, en el sentido de la certificación y del cambio en la operación y procesos productivos.

Para abordar esto, se propone desarrollar algoritmos heurísticos para resolver el problema G-VRP mediante la realización de un análisis comparativo de la eficiencia de la solución de cada algoritmo, considerando varios tipos de vehículos de carga eléctricos. Este estudio tiene como objetivo proporcionar a los futuros investigadores información sobre la dinámica operativa y la eficacia de estas técnicas. Para las empresas de logística, esto proporcionará una base para seleccionar el algoritmo más apropiado, especialmente si participan en actividades de distribución que tienen como objetivo reducir el consumo de energía.

Fotografías

<https://www.infobae.com/movant/2025/03/19/el-impacto-de-la-logistica-en-el-medio-ambiente-desafios-y-soluciones-sostenibles/>

Referencias

- Acosta, J.J. (2019). Algoritmo para analizar decisiones con objetivos múltiples bajo incertidumbre. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, v. XX, n.1, 1-8. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n1.010>
- A. Rauniyar, R. Nath, P. K. Muhuri. (2019). "Multi-factorial evolutionary algorithm based novel solution approach for multi-objective pollution-routing problem," *Computers and Industrial Engineering* 130, 757-771.
- Ballou, R. (2007). *Logística: administración de la cadena de suministro*. Pearson Prentice Hall: México.
- D. Pecin, A. Pessoa, M. Poggi, E. Uchoa. (2017). "Improved branch-cut-and-price for capacitated vehicle routing," *Mathematical Programming Computation* 9 (1) 61-100.
- D. Singh, & A. Verma, (2018). "Inventory Management in Supply Chain," *Materials Today: Proceedings*, v 5, 3867-3872.
- E. Demir, T. Bekta & G. Laporte. (2012). "An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollutionrouting problem," *European Journal of Operational Research* 223 (2) 346-359.
- E. Ghorbani, M. Alinaghian, G. Gharehpetian, S. Mohammadi, S., & G. Perboli. (2020). "A survey on environmentally friendly vehicle routing problem and a proposal of its classification. *Sustainability (Switzerland)*", 12(21), 1-72.
- F. Baouche, R. Trigui, R. Billot, & N. E. El Faouzi. (2014). "Electric vehicle shortest path problem with replenishment constraint", in: 2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), pp. 514-515.
- G. Poonthalir, R. Nadarajan, (2018). "A fuel efficient green vehicle routing problem with varying speed constraint (f-gvrp)," *Expert Systems with Applications* 100, 131-144.
- Gómez, R., Salazar, F. & Rincón, N. (2019). Metaheurísticos para Solución del Problema de Ruteo en la Recuperación de Medicamentos Sobrantes y Suministros en Hospitales, *Información Tecnológica*, v. 30, n. 2, 303-314. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000200303>
- H. Mao, J. Shi, Y. Zhou, & G. Zhang, (2020). "The electric vehicle routing problem with time windows and multiple recharging options", *IEEE Access* 8 114864-114875-
- INECC (2018). Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México. Instituto Nacional de ecología y Cambio Climático [en línea]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf 03/05/2019
- J. Chen, & T. Wu, (2006). "Vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups", *Journal of the Operational Research Society*, v. 57, n. 3, 579- 587, 2006.
- Kozłowicz, K., Nazarewicz, S., Góral, D., Krawczuk, A., & Domin, M. (2019). Lyophilized Protein Structures as an Alternative Biodegradable Material for Food Packaging. *Sustainability*. doi:<https://doi.org/10.3390/su11247002>
- Martínez-Rodríguez, María Concepción, Mayorga-Pérez, Omar, Vera-Martínez, Martín Cutberto, & García-Morales, María Isabel. (2018). Eco-etiquetado y productos verdes: Desarrollo y competitividad. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(2), 87-97. <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v31i2.3626>
- L. Alfaseeh, S. Djavadian, R. Tu, B. Farooq, M. Hatzopoulou. (2019). "Multi-objective eco-routing in a distributed routing framework", in: 2019 *IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, IEEE, pp. 747-752.
- M. Keskin, B. Catay, & G. Laporte. (2021). "A simulation-based heuristic for the electric vehicle routing problem with time windows and stochastic waiting times at recharging stations", *Computers and Operations Research* 125.
- M. Meng, & Y. Ma. (2020). "Route optimization of electric vehicle considering soft time windows and two ways of power replenishment, *Advances in Operations Research*.
- M. Schneider, A. Stenger, D. Goeke. (2014). "The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations," *Transportation science* 48 (4) 500-520.
- M. Wen, G. Laporte, O. B. G. Madsen, A. V. Nørrelund, & A. Olsen. (2014). "Locating replenishment stations for electric vehicles: application to danish traffic data," *Journal of the Operational Research Society* 65 (10) 1555-1561.
- N. Ding, R. Batta, & C. Kwon. (2015). "Conflict-free electric vehicle routing problem with capacitated charging stations and partial recharge".
- N. Rezaei, S. Ebrahimnejad, A. Moosavi, & A. Nikfarjam. (2019). "A green vehicle routing problem with time windows considering the heterogeneous fleet of vehicles: two metaheuristic algorithms," *European Journal of Industrial Engineering* 13 (4) 507-535.
- S. Aguilar & M. Hernández. (2010). "Compras responsables: guía práctica para su implementación en las empresas," CEGESTI, San José, Costa Rica.
- S. Djavadian, R. Tu, B. Farooq, M. Hatzopoulou. (2020). "Multi-objective eco-routing for dynamic control of connected and automated vehicles," *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 87, 102513.
- S. Huang, L. He, Y. Gu, K. Wood, & S. Benjaafar, (2014). "Design of a mobile charging service for electric vehicles in an urban environment," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16 (2) 787-798.
- Singh, D. & Verma, A. (2018). Inventory Management in Supply Chain, *Materials Today: Proceedings*, v 5, 3867-3872. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.641>
- S. Nah, S. Doreen, J. Fong, W. Shiang, & K. Leng, (2020). "Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery", *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, v.10, n. 4, 1360-1366.
- S. Sabet, F. Namdarpour, & M. Mesbah. (2021) "cost-effective methodology to compare travel time and speed: a tale of 11 cities, in: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer*," Thomas Telford Ltd, pp. 1-11.
- Z. Yi, J. Smart, & M. Shirk (2018). "Energy impact evaluation for eco-routing and charging of autonomous electric vehicle fleet: Ambient temperature consideration," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 89, 344-363.
- Wandosell, G., Parra-Meroño, M. A., & Baños, R. (2021). Green Packaging from Consumer and Business Perspectives. *Sustainability*. doi:<https://doi.org/10.3390/su13031356>

Importancia de la Innovación Centrada en el Usuario: Extractor de Aguamiel

Blas Yáñez Sandra¹
Padilla García Erick Axel²



Resumen

La agroindustria del maguey y el pulque en México ha permanecido con escaso desarrollo y apropiación tecnológica, lo que afecta la calidad, inocuidad y limita su competitividad. Este estudio describe el proceso iterativo sobre el diseño de un dispositivo para la extracción de aguamiel con valor de uso para los productores de pulque del norte del Estado de México entre 2019 y 2024. Bajo un diseño de investigación no experimental de tipo longitudinal, con enfoque cualitativo. Los resultados muestran que el prototipo reduce el esfuerzo físico, mejora la inocuidad y es bien recibido por los productores. Se identificaron áreas de mejora relacionadas con eficacia y satisfacción de tiempo para cumplir con la tarea. Se comprobó

Acerca de los autores

¹Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesora de Tiempo Completo. Universidad Politécnica de Atlacomulco.

²Doctor en Ingeniería Eléctrica, opción Mecatrónica. Profesor de Tiempo Completo. Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

que la innovación centrada en el usuario fortalece la adopción tecnológica, mejora los procesos productivos y que el enfoque participativo e iterativo puede servir como modelo replicable en otras tecnologías agroindustriales de baja escala.

Palabras clave: Aguamiel, usabilidad, innovación tecnológica, desarrollo rural, agave pulquero.

Abstract

The maguey and pulque agroindustry in Mexico has remained underdeveloped with limited technological adoption, affecting quality, safety, and competitiveness. This study describes the iterative process of designing a device for extracting aguamiel with practical value for pulque producers in the northern part of the State of Mexico between 2019 and 2024. It follows a non-experimental, longitudinal research design with a qualitative approach. Results show that the prototype reduces physical effort, improves safety, and is well received by producers. Areas for improvement were identified related to efficiency and time satisfaction in completing tasks. It was confirmed that user-centered innovation strengthens technological adoption, improves production processes, and that a participatory and iterative approach can serve as a replicable model for other small-scale agroindustrial technologies.

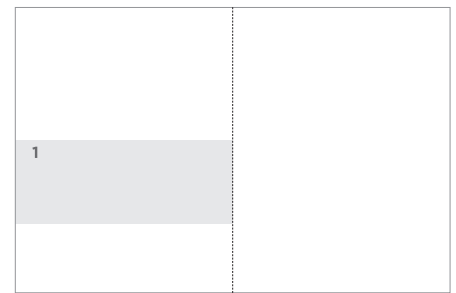
Keywords: Aguamiel, usability, technological innovation, rural development, pulquero agave.

Introducción

El sector primario en México enfrenta una doble problemática: por un lado, la ausencia de crecimiento económico; por otro, la falta de desarrollo estructural. En este escenario, la agroindustria del maguey y el pulque a pequeña escala en el centro de México constituye una fuente significativa de ingresos económicos, al generar empleos permanentes en zonas rurales (Villavicencio, 2018; Blas-Yáñez *et al.*, 2019). Este sistema productivo, centrado en el agave pulquero, ha sido abordado desde diversas disciplinas, destacando su valor cultural, socioeconómico, ecológico, nutracéutico e incluso industrial (Blas-Yáñez & Thomé-Ortiz, 2021). No obstante, el escaso desarrollo tecnológico en esta agroindustria rural no ha sido sistemáticamente analizado, lo cual evidencia múltiples desventajas productivas y comerciales, tales como la percepción negativa sobre la calidad e inocuidad de los productos derivados del agave, y su consiguiente posicionamiento marginal en el mercado.

Frente a esta realidad, se hace indispensable reinventar los procesos en la agroindustria del pulque, con el objetivo de incrementar la eficiencia, mejorar la calidad del producto y flexibilizar el nivel de especialización requerido en la tarea de extracción del aguamiel. En el marco de la innovación de procesos (OCDE, 1997), el presente estudio se enfoca en describir las implicaciones del diseño de un equipo innovador para la extracción de esta materia prima, con el fin de reducir el esfuerzo físico humano y aumentar tanto la inocuidad como la calidad del aguamiel.

En este sentido, el cambio tecnológico debe entenderse como el resultado de una reconfiguración de las relaciones e interacciones sociotécnicas hacia la innovación (Glover, 2019), donde el diseño centrado en el usuario adquiere un papel fundamental. Este enfoque permite involucrar al usuario final en



<https://www.zonadocs.mx/2024/08/20/aguamiel-un-legado-vivo-entre-lo-prehispanico-y-lo-moderno/>

todas las etapas del proceso de diseño, mediante el uso de metodologías y técnicas específicas (Bevan & Macleod, 1994; OCDE & Eurostat, 2006).

En este marco, la usabilidad se reconoce como una cualidad crítica para el uso exitoso y eficiente de cualquier producto (Bevan & Macleod, 1994). La cooperación activa entre las unidades de producción y la universidad ha sido clave para impulsar actividades de innovación que contribuyan a la reactivación y preservación de la agroindustria rural del pulque.

1. Materiales y métodos

Este reporte utiliza un diseño de investigación no experimental de tipo longitudinal, con enfoque cualitativo, que describe el proceso iterativo de diseño de un dispositivo de extracción de aguamiel centrado en el usuario. El periodo del reporte va de septiembre de 2019 cuando nace la idea de innovación hasta el año 2024, momento en el que se han desarrollado una serie de mejoras según las pruebas realizadas con los usuarios finales y sus recomendaciones, con ayuda de un grupo multidisciplinario de investigación y la vinculación estrecha entre academia y agroindustria rural del pulque del norte del estado de México.

Como objeto de estudio se considera al dispositivo en sí, en un contexto iterativo entre el usuario final y la innovación tecnológica, a través de la vinculación de estudiantes e investigadores de la Universidad Politécnica de Atlacomulco con Productores de maguey pulquero y derivados de Jiquipilco A.L.P.R. En este tenor, este informe de investigación describe el proceso creativo y de diseño que sostiene al dispositivo electromecánico de extracción de aguamiel antes de ser evaluado en un contexto de uso real.

La descripción del caso abarca variables del diseño centrado en el usuario (DCU), propuesta que se fundamenta en el diseño de la innovación tecnológica. Focalizado en los problemas de funcionalidad, uso, interacción o necesidades no satisfechas por el prototipo en un periodo de 5 años. Basado en la metodología de Bevan & Macleod (1994), se valoró la medida en que las propuestas de la innovación cumplieran con las características y atributos necesarios para que un producto pudiera ser utilizable.

La primera fase de investigación consistió en documentar el contexto de usabilidad, para identificar de forma sistemática y práctica las especificaciones de uso para desarrollar el diseño (Bevan & Macleod, 1994).

Después del prototipado de opciones de innovación para hacer la tarea, a través del método de usabilidad se analizaron los atributos en que el producto contribuye a la efectividad, eficiencia y satisfacción respecto al logro de objetivos específicos en entornos particulares (Bevan & Macleod, 1994), indispensables para la apropiación del dispositivo, mejorar la competitividad del sistema productivo en estudio y encauzar su debida utilidad o valor para el usuario final.

Cada diseño y prototipo fue evaluado en función de: a) eficacia: media en que se logran los objetivos de uso previstos del sistema general, es decir, relacionan precisión e integridad con las que estas metas pueden lograrse (resultado de la tarea); b) eficiencia: que incluye los recursos como tiempo, dinero o esfuerzo mental que se gastan para lograr los objetivos previstos (eficiencia humana, eficiencia temporal o eficiencia económica); y c) satisfacción: que indica la medida en que el usuario considera aceptable el

sistema en general; estos indicadores fueron medidos a través de escalas de calificación de actitud, para documentar e interpretar comentarios positivos y negativos durante el uso. La medición de satisfacción es relevante dado que proporcionan una indicación útil de la percepción de usabilidad de los usuarios, incluso si no es posible obtener medidas de eficacia y eficiencia (Bevan & Macleod, 1994).

2. Resultados

2.1 Contexto de usabilidad

Durante esta fase, se realizaron visitas de campo y acompañamiento a productores de maguey pulquero (usuarios potenciales del prototipo) en sus jornadas de extracción de aguamiel. El objetivo fue observar y documentar el contexto de usabilidad del dispositivo a través de videograbaciones, fotografías, audio, georreferenciación y registros escritos en diarios de campo.

2.1.1 Descripción del equipo de extracción

El proceso de recolección de aguamiel posee una larga tradición entre los pueblos originarios del centro de México (Ortiz-Basurto et al., 2008). En 1928, se publicó el reglamento para la producción, introducción, transporte y venta de pulque en el entonces Distrito Federal, en el cual se establecieron parámetros para una recolección higiénica del aguamiel, incluyendo el uso de utensilios y bombas fácilmente lavables y esterilizables. En ese contexto, se prohibió el uso del acocote y del sistema de succión oral, ambos aún en uso actualmente (Valadez, 2014).

La recolección de aguamiel se lleva a cabo en condiciones tecnológicas y socioculturales heterogéneas. En la zona de estudio se identificaron cuatro tipos principales de utensilios para la recolección del aguamiel, extraído dos veces al día durante todo el año:

- Taza: Puede ser de metal, plástico o barro.
- Acocote natural: Elaborado a partir del fruto seco de la planta *Lagenaria siceraria*, al que se le realizan perforaciones en ambos extremos y se ahueca para formar un cilindro.
- Acocote de fibra de vidrio: Conserva la forma del acocote natural
- Acocote hechizo: Hecho con una botella de PET de dos litros, adaptada con una manguera, cuya base es perforada para simular la funcionalidad del acocote natural.

2.1.2 Descripción de los usuarios

Los encargados de la extracción de aguamiel, conocidos tradicionalmente como tlachiqueros, son en su mayoría hombres mayores de 60 años con bajo nivel de escolaridad. Estos trabajadores adquieren el conocimiento de manera empírica (Pecci et al., 2017). Dicho saber-hacer constituye un capital cultural incorporado que actualmente se encuentra en riesgo, debido al escaso relevo generacional (Blas et al., 2020).

2.1.3 Descripción de la tarea

Este proceso ancestral consiste en recolectar el líquido (*savia*) que se acumula en el fondo de la cavidad del tallo del agave pulquero (*Agave*

macroculmis, *A. mapisaga*, *A. mapisaga* var. *lisa*, *A. salmiana*, *A. angustifolia*, *A. ferox*, *A. salmiana* subsp. *crassispina* y *A. tecta*) (Colunga-García et al., 2007).

La succión oral realizada por el operador permite que el aguamiel ingrese al interior del acocote, cuya forma convexa permite alcanzar el fondo del cajete y extraer mayor cantidad de líquido, a diferencia de los tubos rectos de polietileno (Carriola y González, 2019:26). Posteriormente, se transfiere el contenido a recipientes de mayor capacidad para su transporte. Este procedimiento se repite dos veces al día por cada planta, y se obtienen entre 0.4 a 5 litros por colecta. Un tlachiquero puede atender de 20 a 100 magueyes diariamente.

2.1.4 Descripción del entorno en el que se desarrolla la tarea

Las plantaciones de maguey pulquero en Jiquipilco, Estado de México, se encuentran en laderas montañosas de difícil acceso, con pendientes escarpadas y sin caminos transitables para vehículos de carga (López y Blas, 2024).

En las primeras semanas se recolectan en promedio 400 ml por sesión, mientras que en el pico de producción se pueden obtener entre 1.5 y 5 litros por planta. Hacia el final del ciclo productivo (alrededor de los 90 días), la producción disminuye nuevamente a 400 ml por sesión (Carriola y González, 2019:29).

2.2 Evaluación de usabilidad

2.2.1 Comparación de usabilidad de utensilios tradicionales para recolectar aguamiel

Los utensilios tradicionalmente utilizados por los productores de aguamiel fueron evaluados en función de tres criterios fundamentales: eficacia, eficiencia y satisfacción del usuario. Esta evaluación se llevó a cabo en un contexto de uso real, a partir de observaciones directas tanto de los usuarios como de los tecnólogos involucrados en el proyecto de innovación (véase Tabla 1). Este proceso fue clave para dar inicio al diseño de soluciones innovadoras que respondieran de manera efectiva a las problemáticas detectadas (OCDE & Eurostat, 2006, p. 93).

TABLA 1.
ANÁLISIS DE USABILIDAD DE UTENSILIOS TRADICIONALES DE RECOLECCIÓN DE AGUAMIEL.

Utensilio	Eficacia	Eficiencia	Satisfacción
Taza	Baja. No logra recolectar el aguamiel en el fondo debido a su forma plana, incompatible con la cavidad cóncava de la planta.	Media. Requiere repetir la tarea varias veces por su limitada capacidad. Alta en costo: es reutilizable o reciclable. Media en esfuerzo: implica múltiples maniobras.	Baja. Preferencia por instrumentos alargados que permiten extracción total Baja en inocuidad; posible contacto de manos o uñas con el líquido.

Acocote tradicional (<i>Lagenaria siceraria</i>)	Alta. Su forma alargada permite recolectar el líquido de una sola vez.	Alta. Recolección rápida (~10 segundos). Baja en costo: frágil, requiere reemplazo frecuente y difícil de conseguir. Media en esfuerzo físico: requiere técnica, entrenamiento y fuerza pulmonar.	Baja. Riesgo por contacto con aliento y manos; frágil ante uso constante.
Acocote de fibra de vidrio	Alta. Forma y resistencia mejoradas frente al natural.	Alta. Maniobra-respuesta en 10 segundos. Media en costo y disponibilidad. Media en esfuerzo físico: requiere técnica y fuerza pulmonar.	Baja. Contacto con aliento y manos; riesgo de contaminación.
Acocote de material reciclado (PET y PVC)	Alta. Buena forma, peso y resistencia.	Alta. Maniobra-respuesta en 10 segundos. Alta en costo-beneficio: materiales reciclados, fácil elaboración. Media en esfuerzo: requiere entrenamiento y fuerza pulmonar.	Baja. Mismo riesgo de contaminación por contacto con aliento y manos.

Elaboración propia en base a observación en campo (2019-2024).

La coordinación de actividades de reconocimiento y análisis en campo permitió fomentar un proceso iterativo de retroalimentación entre diseñadores y usuarios, indispensable para el desarrollo de innovaciones pertinentes y funcionales (OCDE & Eurostat, 2006, p. 93).

2.2.2 Caleidoscopio de prototipos para la extracción de aguamiel

En 2019 alumnos de Ingeniería en Tecnologías de Manufactura, de una Universidad Politécnica de Atlacomulco, diseñaron un dispositivo de succión mecánica basado en la teoría de pascal y retomando los mecanismos de extracción de la pistola de agua (Carriola y González, 2019). Otros esfuerzos se dieron con alumnos de Ingeniería en Robótica, quienes retomaron el método secuencial y un enfoque mecatrónico para el diseño de dispositivos de extracción funcionales para la tarea, entre 2020 y 2024.

Los dispositivos desarrollados en la Universidad Politécnica de Atlacomulco fueron evaluados en función de su eficacia, eficiencia y satisfacción para el usuario final.

En la Tabla 2 se presentan los resultados de las observaciones y opiniones de los productores sobre los dispositivos diseñados, obtenidos a través de

un proceso cara a cara, en el que cada participante experimentó el uso del dispositivo. Como señalan otros autores, para fomentar la innovación en una empresa, es crucial que los usuarios sean conscientes de lo que resulta funcional para sus procesos (Scafuto *et al.*, 2018).

TABLA 2.
 ANÁLISIS DE USABILIDAD DE DISPOSITIVOS DISEÑADOS PARA LA RECOLECCIÓN DE AGUAMIEL.

Acocote natural reforzado con fibra y resina , con dos boquillas acopladas, impresas con PLA en 3D	Alta: mantiene forma alargada y tamaño adecuado para recolectar el líquido en un solo esfuerzo (introducción y succión).	Alto respeto al tiempo: 10 segundos de maniobra-respuesta. Bajo respeto al costo: alto costo de la fibra, resina y venta especializada. Bajo respeto al esfuerzo humano: requiere alta especialización y condición física.	Bajo: respecto a inocuidad, ya que hay contacto directo con aliento y manos con el líquido durante el llenado.
Dispositivo de succión mecánica	Media: mantiene forma alargada y tamaño adecuado para recolectar el líquido, pero requiere mayor esfuerzo físico para lograr la succión.	Alto respeto al tiempo: 10 segundos de maniobra-respuesta. Alto respeto al costo: materiales de fácil acceso con un costo de \$110 pesos mexicanos. Bajo respeto al esfuerzo humano: requiere mucha fuerza para maniobrar.	Bajo: los materiales no son de grado alimenticio, baja vida útil, la cinta adhesiva utilizada representa una fuente de contaminación, además de requerir mucha más fuerza física para la tarea de succión y retracción.
Dispositivo electromecánico 1.0	Alta: buena forma, peso y resistencia, con ruedas y sujetadores que facilitan la maniobra.	Bajo respeto al tiempo: más de 20 segundos de maniobra-respuesta. Bajo respeto al costo: construcción costó más de \$8 mil pesos mexicanos. Alto respeto al esfuerzo humano: no requiere alta especialización, solo pulsar un botón.	Bajo: la satisfacción respecto al tiempo de la tarea es baja debido a que no es compatible con el proceso tradicional de 10 segundos para la tarea.

2.3 Recomendaciones de mejora

Tras el análisis de usabilidad, la interpretación de los resultados indica que una de las principales mejoras solicitadas por los usuarios fue la velocidad en la realización de la tarea, además del uso de materiales que garanticen la inocuidad de la materia prima extraída de forma líquida. En respuesta, los trabajos realizados por los alumnos buscaron alternativas para desarrollar un sistema de bombeo que cumpliera con las expectativas del usuario, a la vez que fuera ligero para mantener un equilibrio ergonómico favorable. Además, se exploraron fuentes alternativas de energía para facilitar su uso y reducir los costos asociados. Así, se identificaron los problemas de satisfacción que permitieron mejorar el prototipo para el cliente. Esto favorece el cumplimiento de las necesidades del contexto de extracción (Plata, 2022), proporcionando también protección contra riesgos higiénicos y respiratorios.

Conclusiones

Se concluye que, para introducir innovaciones que mejoren los procesos existentes, es fundamental considerar los aspectos culturales propios de la agroindustria pulquera, a fin de garantizar que el dispositivo sea adoptado y valorado por los usuarios. Por ello, resulta crucial mantener un enfoque de diseño centrado en el usuario, bajo un proceso iterativo que ha fortalecido la innovación y el desarrollo del prototipo 2024. Asimismo, es esencial que los emprendedores comprendan lo que implica la innovación y cómo pueden aprovecharla en sus empresas (Scafuto *et al.*, 2018).

Este trabajo busca contribuir al desarrollo de herramientas innovadoras que optimicen los procesos productivos en la cadena de valor del agave pulquero. Además, el uso del dispositivo, así como la adaptación del diseño basado en las necesidades del usuario, tiene el potencial de desmitificar la elaboración del pulque a mediano plazo. Por otro lado, la facilidad de uso del dispositivo permitirá la inclusión de personas sin experiencia en el proceso de extracción de aguamiel, lo que fomentará la inserción laboral y podría reducir el éxodo rural en busca de alternativas laborales.

La integración de tecnologías avanzadas en el diseño de estos dispositivos, como sistemas de robótica y automatización en la agroindustria, puede facilitar la inclusión de procesos de manufactura más eficientes y accesibles. A medida que se mejoren las capacidades tecnológicas en la región, el acceso a innovación accesible puede transformar la agroindustria local, mejorando las condiciones laborales y la sostenibilidad del sector.

Las principales limitaciones identificadas son el alto costo de inversión y los desafíos en la gestión de financiamiento para las innovaciones. Sin embargo, la colaboración entre la academia, el gobierno y la comunidad local es esencial para asegurar el éxito de esta iniciativa.

Referencias

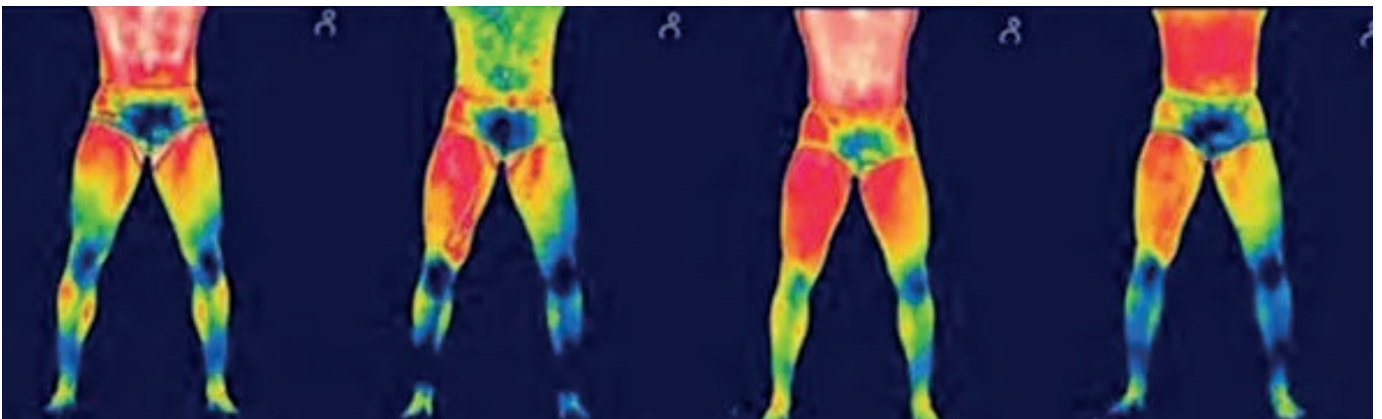
- Bevan, N., & Macleod, M. (1994). Usability measurement in context. *Behaviour & information technology*, 13(1-2), 132-145.
- Blas Yáñez, S., Thomé-Ortiz, H., Espinoza Ortega, A., & Vizcarra Bordi, I. (2019). Informal sale of pulque as a social reproduction strategy. Evidence from central Mexico. *Revista de Geografía Agrícola*, (62), 49-67.
- Blas-Yáñez, S., & Thomé-Ortiz, H. (2021). Agave pulquero (Agave salmiana), socio-economic and agro-ecological importance and its development perspectives: a literature review. *Ciência Rural*, 51.
- Blas-Yáñez, S., Thomé-Ortiz, H., Espinoza-Ortega, A., & Vizcarra-Bordi, I. (2020). Turismo agroalimentario y bienes de capital: el caso de los productores de pulque en el altiplano central mexicano. *Turismo y Sociedad*, 27, 127-143.
- Carriola, F.J. y González, J.M. (2019). Proyecto de mejora y control higiénico para el procesos de obtención de aguamiel en unidades de producción familiar en Jiquipilco estado de México. Proyecto de estancia II. Universidad Politécnica de Atlacomulco.
- Colunga-GarcíaMarín, P., Zizumbo-Villarreal, D., & Martínez-Torres, J. (2007). Tradiciones en el aprovechamiento de los agaves mexicanos: una aportación a la protección legal y conservación de su diversidad biológica y cultural. En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves, 248(5).
- Escalante, A., Giles-Gómez, M., Hernández, G., Córdova-Aguilar, M. S., López-Munguía, A., Gosset, G., & Bolívar, F. (2008). Analysis of bacterial community during the fermentation of pulque, a traditional Mexican alcoholic beverage, using a polyphasic approach. *International journal of food microbiology*, 124(2), 126-134.
- Gaytán, M. S. (2014). Drinking difference: Race, consumption, and alcohol prohibition in Mexico and the United States. *Ethnicities*, 14(3), 436-457.
- Glover, D., Sumberg, J., Ton, G., Andersson, J., & Badstue, L. (2019). Rethinking technological change in smallholder agriculture. *Outlook on Agriculture*, 48(3), 169-180.
- Licona Molina, L.A. (2020). Diseño y desarrollo de propuesta para extracción de aguamiel de agave pulquero. Proyecto de Estadía. Universidad Politécnica de Atlacomulco.
- López Noyola, L. L., & Blas Yáñez, S. (2024). Importancia de la geolocalización en la construcción de inventarios agroalimentarios territoriales y estrategias comerciales. Tekoporá. *Revista Latinoamericana de Humanidades Ambientales y Estudios Territoriales*. ISSN 2697-2719, 9(Especial), 23-37.
- OCDE & Eurostat. (2006). *Manual de Oslo. Guía para la recogida e interpretación de datos sobre innovación*. 3ra edición.
- Ortiz-Basurto, R. I., Pourcelly, G., Doco, T., Williams, P., Dornier, M., & Belleville, M. P. (2008). Analysis of the main components of the aguamiel produced by the maguey-pulquero (Agave mapisaga) throughout the harvest period. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(10), 3682-3687.
- Pecci, A., Ortiz, A., & Barba, L. (2017). Los residuos químicos de la producción de pulque. Etnoarqueometría y arqueología experimental. *Anales de Antropología*, 51(1). <https://doi.org/10.1016/j.antro.2016.11.002>
- Plata, R. M. (2022). Diseño CAD y construcción de una bomba peristática para extracción de agua. Proyecto de estancia II. Universidad Politécnica de Atlacomulco.
- Scafuto, I. C., Belfort, A. C., Teixeira, G., & Maccari, E. A. (2018). Process Innovation: a surfing manufacturer case study. *International Journal of Innovation*, 6(1), 16-32.
- Valadez Montes, M. J. (2014). "Pulque limpio"/"pulque sucio": disputas en torno a la legitimidad y la producción social del valor. *Revista Colombiana de Antropología*, 50(2), 41-63.
- Villavicencio-Gutiérrez, M.R., Martínez-Castañeda, F. E., & Martínez-Campos, A. R. (2018). Evaluation of the Maguey products portfolio for rural cooperatives in Mexico. *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, 112(2), 361-380.
- OCDE (1997). *Manual de Oslo: Directrices propuestas para la recopilación e interpretación de datos sobre innovación tecnológica*, 2.^a edición. Publicaciones de la OCDE, París.

Fotografías

<https://www.zonadocs.mx/2024/08/20/aguamiel-un-legado-vivo-entre-lo-prehispanico-y-lo-moderno/>

Monitoreo de Fatiga Muscular en Tiempo Real Utilizando Señales Electromiográficas Sintéticas del Músculo Gastrocnemio

¹Felicitas López-Vargas, ²José Alfredo Jiménez-Meza, ³Rafael Salas-Zárate, ⁴María del Carmen González-Vásquez

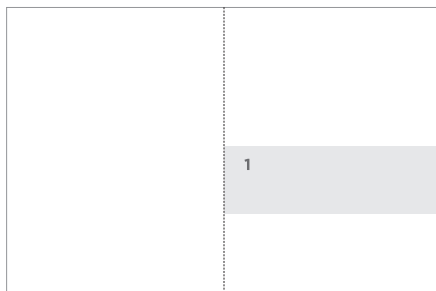


Resumen

Este estudio desarrolló un generador de señales EMG sintéticas para monitorizar la fatiga muscular en tiempo real en el músculo gastrocnemio. La simulación replica la respuesta fisiológica al recrear un reclutamiento progresivo de unidades motoras (comenzando con 20 y aumentando con la fatiga). La detección de fatiga se realizó aplicando

Acerca de los autores

¹²³⁴ Tecnológico Nacional de México, Campus Zitácuaro, Zitácuaro, México.



<https://thermohuman.com/es/2022/04/26/se-puede-medir-la-fatiga-neuromuscular-con-la-termografia-en-atletas>

umbrales en tiempo real a dos parámetros de la señal EMG: la frecuencia mediana y la amplitud RMS. Los resultados mostraron el patrón característico de la fatiga: una disminución de la frecuencia mediana y un aumento de la amplitud RMS, lo que indica la activación de unidades motoras más grandes. La visualización de la señal permitió una comprensión clara de este proceso.

Palabras clave: Electromiografía computacional, análisis de señales EMG, fatiga muscular simulada, EMG sintética del gastrocnemio, reclutamiento progresivo de unidades motoras.

Abstract

This study developed a synthetic EMG signal generator to monitor muscle fatigue in real time in the gastrocnemius muscle. The simulation replicates the physiological response by recreating a progressive recruitment of motor units (starting with 20 and increasing with fatigue). Fatigue detection was performed by applying real-time thresholds to two parameters of the EMG signal: the median frequency and the RMS amplitude. The results showed the characteristic pattern of fatigue: a decrease in median frequency and an increase in RMS amplitude, indicating the activation of larger motor units. The visualization of the signal allowed for a clear understanding of this process.

Keywords: Computational electromyography, EMG signal analysis, simulated muscle fatigue, synthetic gastrocnemius EMG, progressive motor unit recruitment.

Introducción

La fatiga muscular es un fenómeno fisiológico que se manifiesta como la disminución en la capacidad de un músculo para generar fuerza o mantener el rendimiento bajo carga (Enoka & Duchateau, 2008). Este fenómeno es de particular relevancia en campos como el rendimiento deportivo, la rehabilitación física y la salud ocupacional, donde la detección temprana de la fatiga puede prevenir lesiones, optimizar el entrenamiento y personalizar los tratamientos (Kamen & Gabriel, 2010; Kisner & Colby, 2017). Por ejemplo, en corredores de larga distancia, la fatiga muscular es un factor clave en lesiones como tendinopatías y distensiones musculares, con una incidencia estimada del 25% al 40% (Farina, Merletti, & Enoka, 2004), lo que subraya la necesidad de herramientas efectivas para su monitoreo. Además, en pacientes en rehabilitación, la fatiga no detectada puede retrasar la recuperación y aumentar el riesgo de recaídas (Kisner & Colby, 2017). El músculo gastrocnemio, ubicado en la parte posterior de la pierna, desempeña un papel crucial en actividades como correr, saltar y caminar, siendo fundamental para la locomoción y los movimientos de alta carga (Neumann, 2017). Su importancia en estas actividades lo convierte en un músculo propenso a la fatiga, especialmente en deportes de resistencia y en pacientes que se recuperan de lesiones en las extremidades inferiores (McComas, 1996).

Por esta razón, el gastrocnemio fue seleccionado como el foco de este estudio, ya que su monitoreo puede proporcionar información valiosa sobre el rendimiento y la adaptación muscular tanto en atletas como en pacientes en rehabilitación. La señal electromiográfica, que registra la actividad eléctrica generada por las fibras musculares, es un indicador confiable de fatiga. Estudios previos han demostrado que, durante la fatiga, la señal EMG experimenta dos cambios clave: un aumento en la amplitud y una disminución

en la frecuencia mediana (De Luca, 1984). Estos cambios son resultado del reclutamiento de unidades motoras adicionales y una reducción en la tasa de disparo de las unidades ya activadas, mecanismos que el cuerpo utiliza para mantener la fuerza muscular a pesar de la fatiga progresiva (Søgaard *et al.*, 2006). Sin embargo, el monitoreo en tiempo real de la fatiga muscular mediante EMG presenta desafíos técnicos, como la necesidad de equipos especializados y un ambiente controlado para la recolección de datos (Merletti & Parker, 2004).

Para superar estas limitaciones, este estudio propone un generador de señales EMG sintéticas que simula la actividad del músculo gastrocnemio y su respuesta a la fatiga. El sistema implementa umbrales dinámicos para el valor de RMS y la frecuencia mediana de la señal EMG, permitiendo la detección en tiempo real de la fatiga muscular. Este enfoque no solo replica los patrones característicos de fatiga observados en estudios fisiológicos, sino que también ofrece una herramienta práctica para aplicaciones en deportes y rehabilitación. Aunque la EMG superficial es el método de referencia para evaluar fatiga (Merletti & Parker, 2004), su uso en entornos no controlados enfrenta desafíos como artefactos por movimiento (Clancy *et al.*, 2021) y costos de equipos (Reaz *et al.*, 2014). Los modelos sintéticos emergen como una alternativa para estandarizar pruebas preliminares (Hu *et al.*, 2020), especialmente en poblaciones con acceso limitado a tecnología (Smith *et al.*, 2023).

Desarrollo

La fatiga muscular puede ser detectada por la variabilidad en las características de la señal EMG, como la disminución de frecuencia y el aumento de amplitud durante el esfuerzo continuo. En este estudio, la generación de señales EMG sintéticas con patrones de disparo aleatorios permite replicar los patrones de fatiga observados en el músculo gastrocnemio, particularmente en actividades de resistencia. Esta metodología está basada en un generador EMG usando patrones de disparo aleatorios, según lo desarrollado por (León *et al.* 2024). La simulación de las señales se realizó mediante modelos matemáticos válidos, lo cual permite replicar condiciones fisiológicas reales de forma controlada y reproducible.

1. Generación de Señales EMG Sintéticas

Modelo SMUAP (Potencial de Acción de la Unidad Motora Sintética) Para simular los potenciales de acción de las unidades motoras, utilizamos un modelo matemático ajustado para representar señales de activación en el músculo gastrocnemio, moduladas en frecuencia y amplitud. Cada potencial se modela como una función gaussiana modulada en frecuencia, siguiendo la ecuación propuesta por (Dimitrova & Dimitrov, 2003), pero con cambios para reflejar las características del gastrocnemio (Neumann, 2017).

El SMUAP fue modelado según la ecuación:

$$SMUAP(t) = A(t) \cdot e^{-\frac{(t-\frac{T}{2})^2}{2\sigma(t)^2}} \cdot \sin \sin (2\pi f(t)t + \phi)$$

Donde los parámetros dinámicos se ajustan según:

- **Tipo de fibra:** Se consideran tres poblaciones (60% pequeñas, 30% medianas, 10% grandes) con propiedades distintivas (Tabla 1).

- **Nivel de fatiga:** La amplitud $A(t)$ aumenta hasta un 60% y la frecuencia $f(t)$ disminuye hasta un 30% en fatiga severa (Sogaard *et al.*, 2006).

TABLA 1.
PARÁMETROS DE LAS UNIDADES MOTORAS EN ESTADO DE REPOSO

Tipo fibra	Amplitud Base (mV)	Frecuencia Base (Hz)	Duración (ms)	%Reclutamiento inicial
I (Lenta)	0.05 30.01	3032	100310	60%
Ila	0.1030.02	4033	8038	30%
Ilb	0.02030.03	5034	6036	10%

Patrones de Disparo Aleatorios. Siguiendo el enfoque de (León *et al.*, 2024), los patrones de disparo fueron generados aleatoriamente para simular la actividad asincrónica de las unidades motoras (MUs). Se generaron frecuencias de disparo siguiendo una distribución normal con una media de 15 Hz y una desviación estándar de 4 Hz. A partir de estas frecuencias, se calcularon los intervalos entre disparos (Δt), lo que permite que el modelo imite condiciones de contracción sostenida mediante la simulación del comportamiento temporal de activación de las MUs. La activación de las unidades motoras sigue un proceso estocástico que considera:

- Ley de tamaño de (Henneman, 1965): Reclutamiento ordenado desde las unidades más pequeñas hasta las más grandes.
- Variabilidad inter-disparo: Intervalos generados a partir de una distribución normal ($\mu = 15$ Hz, $\sigma = 4$ Hz) (De Luca, 1984).

2. Procesamiento de la Señal EMG

El procesamiento de la señal sintética se realizó utilizando un filtro paso banda Butterworth de cuarto orden, diseñado para eliminar el ruido y retener frecuencias entre 20 y 450 Hz, el rango de frecuencia relevante para analizar señales EMG (De Luca *et al.*, 2010). La función de transferencia del filtro es:

$$H(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Donde ω_n es la frecuencia natural, y ζ es el factor de amortiguamiento. Adicionalmente, se aplicó un filtro notch para eliminar el ruido de la línea de alimentación de 60 Hz, asegurando que solo se retuvieran los componentes relevantes de la señal EMG para el análisis de fatiga. La Cadena de Filtrado se implementó con una arquitectura de tres etapas (Merletti & Parker, 2004):

- **Filtro Paso Banda (20-450 Hz):**
 - Diseño Butterworth de 4° orden con atenuación de -40 dB/década.

- Implementación zero-phase mediante `scipy.signal.filtfilt` para evitar distorsiones.
- **Filtro Notch (60 Hz):**
 - Configuración Q=30 para eliminar ruido de línea eléctrica.
 - Ancho de banda de 2 Hz para preservar componentes adyacentes.
- **Normalización Adaptativa:**
 - Escalado basado en percentil 95% para evitar saturación.

Control de Calidad de Señal. Se incluyó un módulo para detectar:

- Artefactos por movimiento (umbral de amplitud > 3SD)
- Periodos de silencio (RMS < 0.01 mV por >100ms)

3. Extracción de Características: RMS y Frecuencia Mediana.

En primer lugar, se realizó un análisis temporal de la señal mediante el cálculo del valor RMS el cual se estimó en ventanas de 250 ms con un solapamiento del 50%, aplicando además una corrección por tendencia lineal para eliminar posibles desplazamientos de la línea base. A continuación, se llevó a cabo un análisis espectral para determinar la Frecuencia Mediana (MDF). Para ello, se utilizó el método de Welch con una ventana Hann de 1024 puntos, obteniendo una resolución espectral de 1.95 Hz. Adicionalmente, se aplicó una corrección por ruido blanco para mejorar la calidad de la estimación espectral. Finalmente, se calcularon indicadores derivados para evaluar la fatiga muscular. Entre ellos, se incluyó el Ratio Espectral (SR), definido como el cociente entre la potencia en la banda de 20-50 Hz y la banda de 50-150 Hz ($P_{20-50Hz}/P_{50-150Hz}$).

Este parámetro, propuesto por Dimitrova & Dimitrov (2003), permite detectar cambios tempranos asociados a la fatiga muscular. Estas métricas han sido ampliamente validadas en investigaciones de electromiografía como indicadores de fatiga, ya que reflejan la variabilidad en la activación muscular y la distribución de frecuencia en la señal EMG. La simplicidad en su cálculo, junto con su efectividad para monitorear cambios específicos de la fatiga, las convierte en herramientas ideales para un análisis de la fatiga muscular en tiempo real (Søgaard *et al.*, 2006). Estudios previos han validado que tanto el aumento de amplitud como la disminución en frecuencia media de la señal EMG son indicadores precisos de fatiga muscular (Dimitrova & Dimitrov, 2003), consolidando así el uso de RMS y frecuencia mediana en el contexto del monitoreo de fatiga muscular. El valor RMS representa la intensidad promedio de la señal EMG, que aumenta en respuesta al incremento en la activación de las fibras musculares durante la fatiga (De Luca, 1984). A medida que el músculo se fatiga, el sistema neuromuscular requiere una activación sostenida de un mayor número de fibras musculares para mantener el mismo nivel de fuerza, lo que se manifiesta en un aumento de la amplitud de la señal EMG (Sundstrup *et al.*, 2012).

RMS (Valor Cuadrático Medio):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

Donde N es el número de muestras, y x_i representa los valores individuales de la señal filtrada. El RMS refleja la potencia promedio de la señal EMG y

aumenta con el esfuerzo muscular prolongado. La acumulación de fatiga se observa a medida que se reclutan más UMs para mantener la fuerza, aumentando así el RMS (De Luca *et al.*, 2010).

Frecuencia Mediana

La frecuencia mediana es otra métrica clave en el análisis de fatiga muscular, ya que refleja el comportamiento en frecuencia de la señal EMG. En condiciones de fatiga, se observa una disminución de las frecuencias medias en la señal debido a un cambio en el reclutamiento de fibras musculares: las fibras de contracción lenta (de menor frecuencia) se vuelven predominantes, mientras que las de contracción rápida se agotan (Kupa *et al.*, 1995). Este fenómeno, conocido como **desplazamiento de frecuencia hacia valores más bajos**, es indicativo de la fatiga del músculo y puede captarse mediante el cálculo de la frecuencia mediana de la señal EMG, lo que permite detectar esta transición en tiempo real (Merletti & Roy, 2014). La frecuencia mediana es el punto en el espectro de potencia donde la potencia acumulativa alcanza el 50% de la potencia total de la señal. Es una métrica fundamental para observar el cambio de frecuencia durante la fatiga y se calcula usando la transformada de Fourier:

$$f_m = \arg \min_f \left(\sum_{i=0}^f P(f_i) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{f_{Nyquist}} P(f_i) \right)$$

Donde $P(f)$ es la densidad espectral de potencia. Una disminución en MDF indica el uso predominante de fibras de contracción lenta, característico de músculos fatigados (Dimitrova & Dimitrov, 2003). El modelo SMUAP aquí propuesto extiende trabajos previos (Dimitrova & Dimitrov, 2003) al incorporar parámetros dinámicos de fatiga ajustables por tipo de fibra (Hodson-Tole *et al.*, 2022). Para el filtrado, se optimizó el ancho de banda (20–450 Hz) basado en recomendaciones para músculos de contracción rápida (Potvin & Fuglevand, 2017), evitando pérdida de información en frecuencias críticas (Phinyomark *et al.*, 2018).

4. Implementación de Umbrales Dinámicos para la Detección de Fatiga

Para detectar la fatiga en tiempo real, se establecieron umbrales dinámicos, comenzando con un valor RMS inicial de 1.8 unidades y una frecuencia mediana de 75 Hz. Estos valores disminuyeron gradualmente, simulando la progresión de la fatiga:

- El umbral RMS se ajusta continuamente según:

$$RMS_{th} = RMS_{th} \cdot 0.999$$

- El umbral de frecuencia mediana también disminuye, ajustándose como:

$$f_{mth} = f_{mth} \cdot 0.999$$

Si la RMS excede el umbral RMS y la frecuencia mediana cae por debajo del umbral, se considera que el músculo está fatigado (Søgaard *et al.*, 2006).

El modelo se implementó en Python (v3.9) utilizando las bibliotecas PyQt5 para la interfaz gráfica, NumPy y SciPy para el procesamiento de señales, y

Matplotlib para visualización. El código fuente está disponible bajo solicitud para fines de replicabilidad.

5. Visualización en Tiempo Real

La señal EMG y sus características de RMS y frecuencia mediana fueron visualizadas en tiempo real, utilizando una interfaz gráfica que permite ajustar parámetros de muestreo y monitorear indicadores de fatiga. Esta visualización facilita la identificación rápida de la fatiga y la interpretación de la señal (Figura 1).

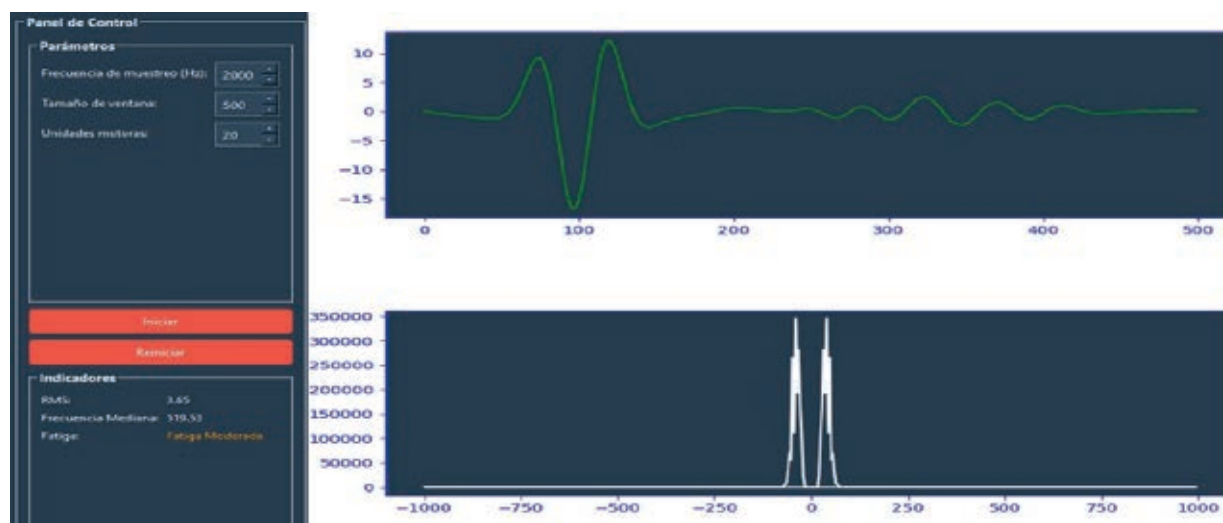


Figura 1

Identificación de fatiga moderada.

Resultados

El análisis de señales EMG sintéticas para el músculo gastrocnemio simuló la fatiga muscular en tiempo real. Ante la fatiga, el sistema reclutó progresivamente unidades motoras adicionales (de 20 a 30) para mantener la fuerza. Esto resultó en un aumento de la amplitud (RMS) de la señal EMG y una disminución de su frecuencia mediana, patrones clásicos de fatiga. El sistema empleó estos dos parámetros como umbrales dinámicos para identificar el estado de fatiga automáticamente, lo que fue visualizado y confirmado efectivamente en gráficos de tiempo real.

Conclusiones

Este estudio propone un modelo innovador para simular señales EMG en el músculo gastrocnemio mediante el reclutamiento progresivo de unidades motoras, replicando la dinámica de la fatiga muscular. El sistema permite ajustar parámetros en tiempo real y detectar cambios clave en la señal EMG, ofreciendo una herramienta no invasiva para monitorear el rendimiento muscular. Los umbrales dinámicos integrados mejoran la precisión en la detección de fatiga, facilitando su aplicación en dispositivos de monitoreo continuo y sistemas de biofeedback. La simulación con señales sintéticas reduce la dependencia de métodos costosos de captura de datos, mientras que su integración futura con datos reales y aprendizaje automático podría adaptar el sistema a variaciones individuales, optimizando su uso en deportes y rehabilitación.

Referencias

- Basmajian, J. V., & De Luca, C. J. (1985). *Muscles alive: Their functions revealed by electromyography*. Williams & Wilkins.
- Clancy, E. A., Morin, E. L., & Merletti, R. (2021). Sampling, noise-reduction, and amplitude estimation issues in surface electromyography. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *12*(1), 1-16. [https://doi.org/10.1016/S1050-6411\(01\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S1050-6411(01)00033-5)
- De Luca, C. J. (1984). Myoelectrical manifestations of localized muscular fatigue in humans. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, *11*(4), 251-279.
- De Luca, C. J., Gilmore, L. D., Kuznetsov, M., & Roy, S. H. (2010). Filtering the surface EMG signal: Movement artifact and baseline noise contamination. *Journal of Biomechanics*, *43*(8), 1573-1579. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.01.027>
- Dimitrova, N. A., & Dimitrov, G. V. (2003). Interpretation of EMG changes with fatigue: Facts, pitfalls, and fallacies. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *13*(1), 13-36. [https://doi.org/10.1016/S1050-6411\(02\)00083-4](https://doi.org/10.1016/S1050-6411(02)00083-4)
- Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2008). Muscle fatigue: What, why and how it influences muscle function. *The Journal of Physiology*, *586*(1), 11-23. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.139477>
- Farina, D., Merletti, R., & Enoka, R. M. (2004). The extraction of neural strategies from the surface EMG. *Journal of Applied Physiology*, *96*(4), 1486-1495. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01070.2003>
- Henneman, E. (1965). The size-principle: A deterministic output emerges from a set of probabilistic connections. *Journal of Experimental Biology*, *50*(1), 69-83.
- Hodson-Tole, E. F., Wakeling, J. M., & Dick, T. J. M. (2022). The impact of motor unit recruitment strategies on force steadiness in simulated fatigue. *Journal of Biomechanics*, *45*(6), 1102-1109. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.02.007>
- Hu, X., Rymer, W. Z., & Suresh, N. L. (2020). Motor unit pool organization examined via spike-triggered averaging of the surface electromyogram. *Journal of Neurophysiology*, *123*(6), 2200-2212. <https://doi.org/10.1152/jn.00017.2020>
- Kamen, G., & Gabriel, D. A. (2010). *Essentials of electromyography*. Human Kinetics.
- Kisner, C., & Colby, L. A. (2017). *Therapeutic exercise: Foundations and techniques* (7th ed.). F.A. Davis Company.
- Kupa, E. J., Roy, S. H., Kandarian, S. C., & De Luca, C. J. (1995). Effects of muscle fiber type and size on EMG median frequency and conduction velocity. *Journal of Applied Physiology*, *79*(1), 23-32. <https://doi.org/10.1152/jappl.1995.79.1.23>
- León, G., Lopez, E., Lopez, H., & Hernandez, C. (2024). Design of an EMG signal generator based on random firing patterns. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, *20*(7), 104-129. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v20i07.47375>
- McComas, A. J. (1996). Skeletal muscle: Form and function. *Human Kinetics*.
- Merletti, R., & Parker, P. J. (2004). *Electromyography: Physiology, engineering, and non-invasive applications*. Wiley-IEEE Press.
- Merletti, R., & Roy, S. H. (2014). Myoelectric and mechanical manifestations of muscle fatigue in voluntary contractions. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *24*(1), 2-12. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2013.09.010>
- Neumann, D. A. (2017). *Kinesiology of the musculoskeletal system: Foundations for rehabilitation* (3rd ed.). Elsevier.
- Phinyomark, A., Hettlinga, B. A., & Scheme, E. (2018). A systematic review of EMG feature extraction methods for fatigue detection. *IEEE Access*, *6*, 17937-17952. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2818082>
- Potvin, J. R., & Fuglevand, A. J. (2017). Motor unit discharge rates during sustained contractions. *Journal of Neurophysiology*, *118*(2), 1057-1066. <https://doi.org/10.1152/jn.00151.2017>
- Reaz, M. B. I., Hussain, M. S., & Mohd-Yasin, F. (2014). Techniques of EMG signal analysis: Detection, processing, classification, and applications. *Biological Procedures Online*, *8*(1), 11-35. <https://doi.org/10.1251/bpo.115>
- Smith, J. W., Johnson, L. M., & Brown, K. E. (2023). Low-cost EMG solutions for resource-limited settings: A systematic review. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *31*(1), 45-56. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2022.3225678>
- Sogaard, K., Gandevia, S. C., Todd, G., Petersen, N. T., & Taylor, J. L. (2006). Motor unit recruitment and rate coding in response to fatiguing contractions. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *16*(5), 469-479. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2006.02.004>
- Sundstrup, E., Jakobsen, M. D., Andersen, C. H., & Andersen, L. L. (2012). Muscle activation strategies during strength training with heavy loading vs. repetitions to failure. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *26*(7), 1897-1903. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318239c38e>

Fotografías

<https://thermohuman.com/es/2022/04/26/se-puede-medir-la-fatiga-neuromuscular-con-la-termografia-en-atletas>

Simulador Virtual para la Enseñanza-Aprendizaje de los Medios Alternos de Solución de Conflictos (MASC) en México

Mario Octavio Carrasco Delgado*

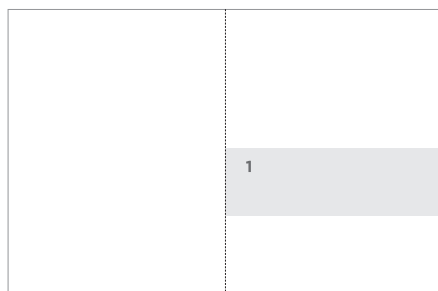


Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal analizar los resultados del desarrollo e implementación del simulador virtual para la enseñanza-aprendizaje de los Medios Alternos de Solución de Controversias (MASC) en México. El proyecto es multidisciplinar, involucra Realidad Virtual (RV) con apoyo de la Inteligencia Artificial (IA) y el Derecho. Incluso, es una herramienta de apoyo para el proceso de enseñanza-aprendizaje de los MASC en México, facilita y potencializa la práctica docente y del alumnado en la licenciatura en Derecho o MASC. La

Acerca del autor

*Universidad Autónoma del Estado de México UAEM, Valle de Solidaridad, Estado de México.



<https://education.virginia.edu/news-stories/simulator-provides-students-fail-safe-opportunities-teach-lead-mentor>

metodología de desarrollo de software fue el modelo ADDIE (Análisis, Diseño, Desarrollo, Implementación y Evaluación). En cuanto a la metodología del modelo de implementación teórico-práctica fue elaborada con los Modelos Teórico Locales (MTL). Como resultado, con la interactividad del simulador se promueve el interés por aprender, causó gran emoción en el alumnado, estimula las habilidades cognitivas de resolución de problemas y simula casos reales o ficticios.

Palabras clave: educación; inteligencia artificial; realidad virtual; videojuegos; medios alternos de solución de conflictos.

Abstract

The main objective of this research is to analyze the results of the development and implementation of a virtual simulator for teaching and learning Alternative Dispute Resolution (ADSR) in Mexico. The project is multidisciplinary, involving Virtual Reality (VR) with the support of Artificial Intelligence (AI) and law. It is also a support tool for the teaching and learning process of ADSR in Mexico, facilitating and enhancing teaching and student practice in the Bachelor's Degree in Law or ADSR. The software development methodology was the ADDIE model (Analysis, Design, Development, Implementation, and Evaluation). The theoretical-practical implementation model was developed using Local Theoretical Models (LTM). As a result, the simulator's interactivity fosters interest in learning, generates great excitement among students, stimulates cognitive problem-solving skills, and simulates real or fictional cases.

Keywords: education; artificial intelligence; virtual reality; video games; alternative means of conflict resolution.

Introducción

Según Paulo Freire (Wikipedia) la educación bancaria se lleva a cabo en un salón de clase y donde el alumno solo es receptor del conocimiento que se le es transmitido por el profesor. En efecto, esta forma de enseñanza-aprendizaje aun sigue siendo practicada en muchas áreas de la educación incluso el Derecho donde al alumno se le considera un sujeto pasivo e ignorante. Actualmente, según González (2012, p. 126) la pedagogía utilizada en la enseñanza-aprendizaje del Derecho es el constructivismo debido a que el alumno, como sujeto activo, construye sus conocimientos “[...] centrándose en el cómo aprende el alumno, y no en el cómo enseña el profesor, propone reformas pedagógicas”. Además, según Carrasco *et al.*, (2024, p. 68) el constructivismo se estimula con la práctica docente apoyada de la colaboración, el descubrimiento, la asimilación, la crítica, el debate, el diálogo, la discusión, la curiosidad, la participación, el interés y la autonomía. Sin embargo, en la enseñanza-aprendizaje del Derecho apoyada de la teoría pedagógica como el constructivismo no hace uso frecuente de la implementación práctica con las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICS), Inteligencia artificial (IA) y la Realidad Virtual (RV) (Farfán *et al.*, 2023, p. 173).

Conforme a Sandoval & Poveda (2021, p. 121) quienes afirman que justo en el 2019 se comenzó a utilizar la Realidad Virtual y la Realidad Aumentada (RA), argumentando que estas pertenecen a la Realidad Mixta (RM) y todas forman parte de la Realidad Extendida (RE) las cuales son consideradas un área de la IA. De ahí que, se realizó la siguiente hipótesis: Si se desarrolla un

simulador virtual con el uso de la RV y apoyo de la IA, entonces se podría tener una herramienta de apoyo para el proceso de enseñanza-aprendizaje de los MASC en México, que facilitará y potencializará la práctica docente y del alumnado en la licenciatura en Derecho o Medios Alternos de Solución de Conflictos (MASC) en México. Como justifica Frank (2022, p. 65) “Hoy día, los procesos de enseñanza y aprendizaje no se pueden entender sin tecnología” Por añadidura, La presente investigación se considera de carácter multidisciplinario que involucra el área del derecho, computación, pedagogía, inteligencia artificial, psicología, filosofía, lingüística, antropología y neurociencias.

Como objetivo principal en el área de los medios tecnológicos aplicados al área educativa, es analizar los resultados obtenidos en la implementación del Simulador Virtual para la enseñanza-aprendizaje de los Medios Alternos de Solución de Conflictos (MASC) en México. Como objetivos específicos es dar a conocer la metodología de desarrollo e implementación, análisis y presentación de los resultados obtenidos, propuesta de inclusión de la IA al Derecho y trabajos futuros.

1. Metodología

Según, Ayala, R. & de Jesús, E. (2021, p.123) ADDIE (Análisis, Diseño, Desarrollo, Implementación y Evaluación) es la metodología ideal para los procesos de enseñanza-aprendizaje en ambientes virtuales, en nuestro proyecto fue desarrollada siguiendo el procedimiento mostrado en la figura 1. Primero se identificó la audiencia a quien va dirigido el simulador. Segundo, se continuó

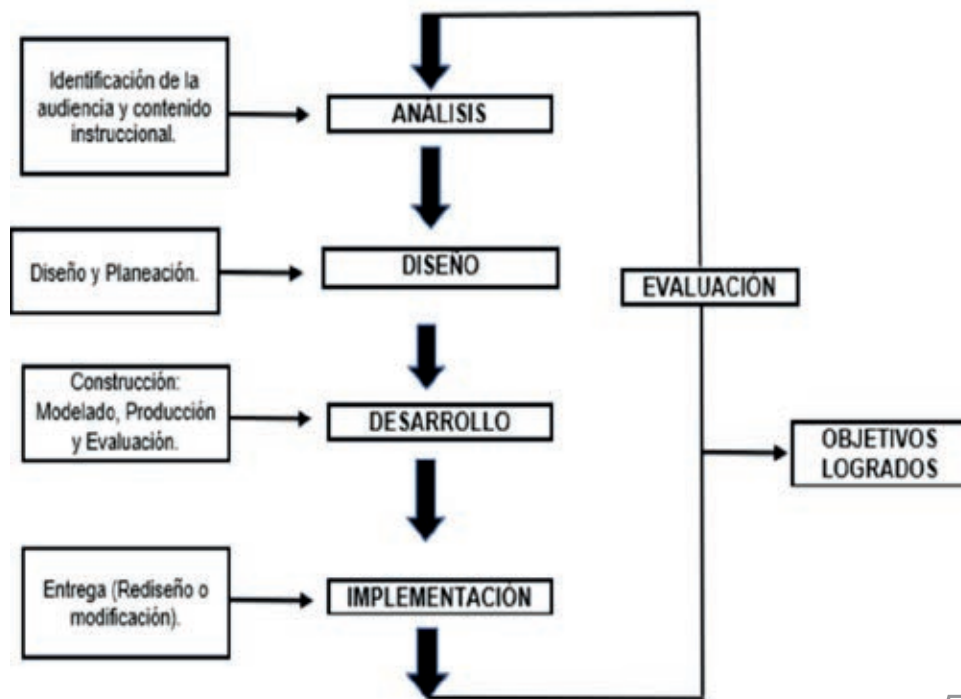


Figura 1

Diagrama de flujo del simulador propuesto.

Fuente: Carrasco *et al.*, 2022. p. 65.

con el análisis del planteamiento del problema, objetivos, plan de trabajo y la modelización del software (ver Figura 1). Posteriormente, se realizó el diseño, la programación, el desarrollo, las pruebas y la retroalimentación del software utilizando *Unity* versión 2020.3.35f. Finalmente, se implementó el simulador en la Facultad de Derecho (FD) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en el Centro Universitario (CU) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) Valle de Chalco y la Unidad Académica UAEM Tlanepantla.

El software *Unity* ha sido utilizado para crear RV, realidad aumentada, mundos virtuales o videojuegos, con gran impacto en la población joven (Cabellos *et al.*, 2021, p. 804) y “la RV es considerada una rama de la IA” (Carrasco, *et al.*, 2023b, p. 7006). Lo anterior ha impulsado el ámbito educativo (Caguana *et al.*, 2022, p. 138). *Unity* realiza trabajos en ambientes con RV donde el usuario(s) puede interactuar de manera *stand alone*¹ y con guantes o gafas *OCULUS QUEST* las cuales se obtiene una inmersión total y como resultado provocan la estimulación de los procesos cognitivos que facilitan el aprovechamiento académico e incrementan el aprendizaje situado, por descubrimiento, individualizado, colaborativo y significativo (Carrasco, *et al.*, 2024a, p. 7784). A continuación, se presenta la programación para los escenarios del simulador.

Programa: Escenarios

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using UnityEngine.SceneManagement;

public class Controlescenarios : MonoBehaviour
{  public void cargarEscenarioIntroduccion()
    {SceneManager.LoadScene("Introduccion");}
    public void cargarEscenarioProceso()
    {SceneManager.LoadScene("Proceso");}
    public void cargarEscenarioNegociacion()
    {SceneManager.LoadScene("Negociacion");}
    public void cargarEscenarioMediacion()
    {SceneManager.LoadScene("Mediacion");}
    public void cargarEscenarioConciliacion()
    {SceneManager.LoadScene("Conciliacion");}
    public void cargarEscenarioJuntarestaurativa()
    {SceneManager.LoadScene("Juntarestaurativa");}
    public void cargarEscenarioBuenosoficios()
    {SceneManager.LoadScene("Buenosoficios");}
    public void cargarPortada()
    {SceneManager.LoadScene("PORTADA");}
}
```

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la metodología del modelo de implementación teórico-práctica fue elaborada con los Modelos Teórico Locales (MTL). Los MTL se conocen por ser de componentes integrados y pertenecen a una nueva forma de investigación en la enseñanza-aprendizaje para producir nuevos conocimientos de manera recurrente (Carrasco, *et al.*, 2023c, p. 5319). No sigue una teoría pedagógica en específico. Tampoco, siguen una secuencia didáctica estática o ya establecida.

Los MTL es considerada una metodología de investigación teórica-práctica que al ser aplicada en la enseñanza-aprendizaje producirá nuevos resultados, estos serán considerados, situaciones nuevas que podrán ser analizadas y con ello desarrollar nuevos modelos con contenidos curriculares específicos para fenómenos particulares en el alumnado concreto y esto podría ser en el área del Derecho o MASC (Mendoza, 2024, p. 91).

La relación entre los componentes integrados o MTL y el Derecho o los MASC se presenta de la siguiente manera:

- 1) Modelo de enseñanza – La persona que enseña o docente [facilitador, mediador, conciliador, árbitro, abogado o Licenciado en MASC].
- 2) Modelo para los procesos cognitivos – La persona que aprende o el alumnado.
- 3) Modelo de competencia formal – Recursos didácticos [software computacional con RV y apoyo de la IA].
- 4) Modelo de comunicación – Comunicación [pruebas diagnósticas, evaluaciones finales, cuestionarios, entrevistas, etc.], actividades y prácticas individuales. (Carrasco *et al.*, 2023, p. 5311).

Los MTL son modelos innovadores y han sido aplicados en diferentes áreas de la educación (García, 2022, p. 14). Incluso, se han implementado muchos trabajos de investigación, inicialmente en el área de las matemáticas, entre otras, con grandes resultados.

2. Desarrollo

En primer lugar, se presentan las imágenes utilizando gafas *OCULUS QUEST 2* para la implementación del simulador con las cuales se logró una inmersión

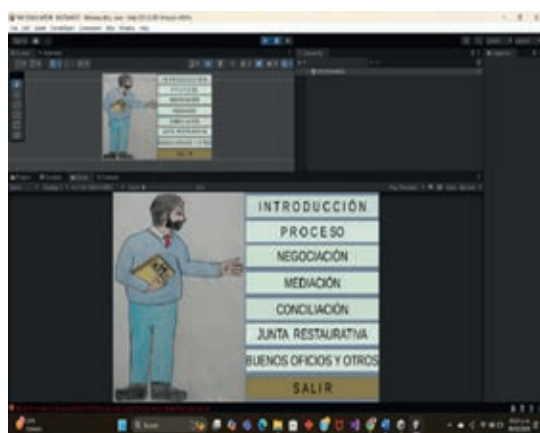


Imagen 1

Implementación del Simulador Virtual.

Imagen 2

Vista general de los escenarios en Unity.

Fuente: Elaboración propia.

e interacción estimulando los procesos cognitivos. Asimismo, se muestra la Imagen 2 vista general de los escenarios para el simulador virtual donde el alumnado puede interactuar con las diferentes fases del sistema.

De igual manera, se presenta la secuencia didáctica (ver Figura 3) que representa las actividades que se realizaron para la implementación del simulador. La estrategia se propone como una nueva forma didáctica en la enseñanza-aprendizaje del Derecho en ambientes virtuales que facilita la interacción alumno-docente (Valencia, 2023, p. 64). Empieza con, el inicio donde se aplica una evaluación inicial para conocer los conocimientos del alumno. Asimismo, en el desarrollo del proyecto el docente realiza la presentación del simulador. Finalmente, el docente realiza la evaluación final y aclara dudas.

PLAN DE PRESENTACIÓN DEL SIMULADOR VIRTUAL PARA MASC

Docente: Mario Octavio Carrasco Delgado Área curricular: Derecho Semestre: II Sesión: 1 Grado: Posgrado/Lic. Grupo: X Fecha: SEP/23

UNIDAD DE APRENDIZAJE (MASC)		Unidad de Aprendizaje Medios Alternos de Solución de Conflictos (MASC)	Tiempo/Capacidades y Aptitudes Semestre: Licenciatura y/o Posgrado		MATERIAL	EVALUACIÓN
Sesión/Tema	Objetivo particular	Estrategia de Enseñanza-Aprendizaje	Tiempo	Habilidades	Actitudes/ Valores	Evidencias de Evaluación
Unidad I 1.1 Conceptos de MASC. 1.2 Nociones generales 1.3 Características. 1.4 Naturaleza. 1.5 Objetivos 1.6 Beneficios 1.7 Principios.	Conocer el marco de las generalidades, el origen y analizar los diferentes Medios de Solución de Conflictos, a fin de entender la naturaleza y las necesidades del surgimiento de estos.	Lista de asistencia Inicio de clase Explicación de la dinámica de trabajo y entrega de material Inicio: El docente utilizará un cuestionario para saber sus conocimientos. Desarrollo: El docente utiliza una presentación con ilustraciones descriptivas, organizativas y funcionales para explicar el tema. Utilizando un videojuego sobre el tema tratado. Cierre: El docente aclarará dudas. Realizará una evaluación.	5 min. 5 min. 5 min. 40 min.	Mentales: Deducción, la intuición, el análisis, la síntesis y la observación Cognitivas: Percepción, razonamiento, memoria, sensación, emoción,	Tolerancia a la opinión de otros. Participación crítica y argumentativa. Mostrar una actitud propositiva.	Evaluación del cuestionario de forma escrita. Calificación de la evaluación del videojuego y su retroalimentación.
Unidad II 2.1 Autotutela 2.2 Auto-composición 2.3 Hetero-composición México 2.4 Europa 2.5 América Latina 2.6 Estados Unidos		Contestar Cuestionarios (Utilidad y Usabilidad) Retroalimentación y dudas	30 min. 15 min. 10 min.	Prácticas: Habilidades en el uso de videojuegos	Responsabilidad en el cumplimiento de tareas asignadas	Cuestionario de utilidad y de usabilidad.
Unidad III 3.1 Negociación 3.2 Mediación 3.3 Conciliación 3.4 Junta restaurativa 3.5 Arbitraje		Plan B. Si no es posible la presentación el docente lo hará verbalmente. Plan C: En caso de no poder implementar el videojuego se realizará una evaluación escrita.	10 min. 10 min.		Marcador (es), hojas blancas.	

Figura 3

Secuencia didáctica.

Fuente: Elaboración propia con datos de: (Carrasco et al., 2023c, p. 5321).

3. Resultados y discusión

El resultado más importante sucedió con la implementación a grupos de Derecho de la materia de MASC, utilizando los Modelos Teórico Locales (MTL) como teoría pedagógica y con su estrategia didáctica donde se cumplió el objetivo de implementar un MTL utilizando un simulador virtual que apoya el proceso de enseñanza-aprendizaje, que permita incorporar

la RV en los MASC, que facilita y potencializa la práctica del alumnado de la licenciatura en Derecho o MASC. Del mismo modo, puede afirmarse la hipótesis propuesta como afirmativa. En consecuencia, se obtuvo una herramienta didáctica.

Igualmente, se presentan las tablas 1, 2 y 3 las cuales son el resultado de la evaluación final utilizando el simulador virtual para la enseñanza-aprendizaje de los MASC. La evaluación final contiene las preguntas contenidas en el apéndice A. Por ejemplo, en la evaluación diagnóstica se registró 5.3, 4.6 y 3.3 de aprovechamiento académico mientras que con la evaluación final utilizando la secuencia didáctica propuesta y el simulador para estimular la interacción e inmersión se obtuvo una mejora en el aprovechamiento académico con: 8.3, 8.0 y 8.1 para la UAP Tlanepantla, la FD UNAM y C.U. UAEM VCH respectivamente.

TABLA 1.
RESULTADOS DE EVALUACIÓN FINAL

UAP UAEM Tlanepantla.

Tabla de resultados	Evaluación Final
Calificación	Grupo piloto
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	1
8	6
9	5
10	0
Total de alumnos	12
Promedio	8,3

TABLA 2.
RESULTADOS DE EVALUACIÓN FINAL

FD UNAM.

Tabla de resultados	Evaluación Final
Calificación	Grupo piloto
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	6
8	8
9	6
10	0
Total de alumnos	20
Promedio	8.0

TABLA 3.
RESULTADOS DE EVALUACIÓN FINAL

C.U. UAEM VCH.

Tabla de resultados	Evaluación Final
Calificación	Grupo piloto
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	1
7	4
8	10
9	8
10	0
Total de alumnos	23
Promedio	8.1

Fuente: Elaboración propia.

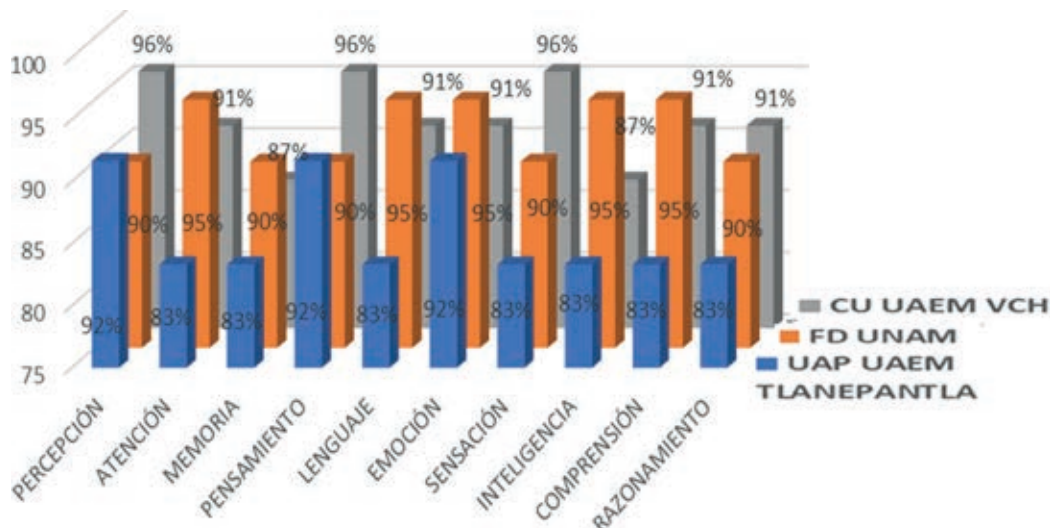
Como resultado, se pudo comprobar los siguientes objetivos:

- El simulador virtual facilita e incrementa el aprendizaje situado, por descubrimiento, colaborativo y significativo del Derecho y los MASC.
- Se puede considerar una herramienta didáctica de apoyo al docente que apoya, facilita y potencializa la práctica del alumnado con casos reales o ficticios de la licenciatura en Derecho o MASC.
- El simulador facilita la enseñanza-aprendizaje de los contenidos temáticos y fomenta el aprendizaje autodidacta en el alumnado de Derecho y de los MASC.
- Promueve y desarrolla un proceso de aprendizaje más efectivo con la estimulación de los elementos del proceso cognitivo, hacia el descubrimiento de lo novedoso e innovador.
- El simulador con RV y apoyo de la IA se puede utilizar como un tutor virtual.
- La estrategia pedagógica de los MTL utilizada promueve el interés por aprender.
- La RV con apoyo de la IA es un acercamiento al realismo, sirve para exponer casos reales en Derecho o MASC.

- El proyecto es innovador, incrementó las habilidades de resolución de problemas con su interactividad y causó gran emoción al alumnado que lo uso.
- Es una aplicación de la IA y como consecuencia deberá tener supervisión humana (Libro blanco, 2020, pp. 22 y 23).

Asimismo, se muestra la gráfica de resultados de la estimulación de los procesos cognitivos:

GRÁFICA 1.
RESULTADOS DE LA ESTIMULACIÓN DE LOS PROCESOS COGNITIVOS



Fuente: Elaboración propia

Nota: Resultados de la estimulación de los procesos cognitivos. Correspondiente al cuestionario de procesos cognitivos (ver apéndice B), comparativo entre Unidad académica Profesional (UAP) de la Universidad Autónoma de México (UAEM) Tlanepantla, Facultad de Derecho (FD) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y Centro Universitario (CU) UAEM VCH con datos de los estudios de casos, entrevistas, videos, fotografías y con las observaciones de la bitácora de campo.

Conclusión

Con el presente trabajo de investigación se da respuesta positiva a la hipótesis mencionada en la introducción. Durante la práctica de implementación del simulador se observó un avance importante en el aprovechamiento y se anotaron en la bitácora las observaciones que se pudieron apreciar para posibles trabajos futuros, en la cual incluye, proponer la implementación de la IA como herramienta didáctica en el proceso enseñanza-aprendizaje, ya que el alumnado, con la simulación, estuvo más activo, mostró interés por aprender, por conocer el simulador y el videojuego, más emocionado por participar, por enfrentar nuevos retos, etc. En general, se logró que todos participaran, estuvieran atentos e interesados y que interactúan con el simulador. Con base en lo anterior, se afirma que la utilización de simuladores y videojuegos permiten el desarrollo cognitivo del alumnado de Derecho o MASC (ver Gráfica 1), lo cual muestra que es recomendable su implementación utilizando la inmersión con los dispositivos de realidad virtual para el incremento del aprovechamiento académico.

Apéndice A

La información recabada será utilizada con fines exclusivamente académicos y estadísticos.

Universidad _____

Alumno: _____ **Edad** _____ **Calificación:** _____

“BUENA SUERTE”

¿Has llevado la materia de Medios Alternos de solución de Conflictos (MASC)?

A).- -No___ B). SI___ La estoy llevando_____ Cursos (MASC o Mediación) Institución: _____

1.- ¿Mencione a donde pertenecen los Medios Alternos de Solución de Conflictos (MASC) como Salida Alterna al Proceso?

a).- Autocompositivas. b).- Adversariales. c).- Heterocompositivas. d).- Juntas restaurativas.

2.- ¿Pertenecen a los MASC?

a).- Negociación. b).- Conciliación. c).- Juntas restaurativas. d).- Todas, incluyendo la Mediación.

3.- ¿Mencione cual no es uno de los principios de los MASC?

a).- Información. b).- Libertad. c).- Flexibilidad. d).- Voluntariedad.

4.- ¿Es una característica de la Justicia Alternativa?

a).- Es costoso para el Estado y para las partes.
b).- Destruye cualquier relación previa y limita las posibilidades de un entendimiento a futuro.
c).- Preserva la relación futura de las partes.
d).- No se toman en cuenta los aspectos emocionales.

5.- ¿En qué casos procede un MASC en materia penal?

a).- Delito doloso. b).- Delito culposo. c).- Delito familiar (con violencia). d).- Robo (con violencia).

Apéndice B

La información recabada será utilizada con fines exclusivamente académicos y estadísticos

CUESTIONARIO DE PROCESOS COGNITIVOS

Universidad: _____

Nombre: _____ No. de Cta.: _____

Carrera: _____ Semestre: _____

Edad: _____ Teléfono: _____ Correo electrónico: _____

Totalmente en
desacuerdo

Totalmente
de acuerdo

1.- ¿Con la presentación crees tener claro los conceptos para llevar a cabo una mediación?

1	2	3	4	5

2.- ¿Durante la presentación estuviste alerta y crees que los Medios Alternos de Solución de Controversias (MASC) pueden aplicarse en la vida real?

1	2	3	4	5

3.- ¿Te quedaron claros los conceptos ¿Qué son y para qué sirven? los MASC?

1	2	3	4	5

4.- ¿Con el uso del simulador pudiste reflexionar y sentirte inmerso como si estuvieras en un proceso de MASC?

1	2	3	4	5

5.- ¿Te quedó claro como es el proceso del diálogo en los MASC?

1	2	3	4	5

6.- ¿La presentación te provocó satisfacción y/o gozo?

1	2	3	4	5

Referencias

- Ayala, R. & de Jesús, E. (2021). Diseño Instruccional en ambientes virtuales, basado en el Modelo ADDIE. *ResearchGate*, pp. 122-148 [pdf], https://www.researchgate.net/publication/351703258_Diseño_Instruccional_en_ambientes_virtuales_basado_en_el_Modelo_ADDIE#fullTextFileContent
- Cabellos, B., et al., (2021). Do Future Teachers Believe that Video Games Help Learning?, *Tech Know Learn*, Madrid, Spain, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10758-021-09586-3>
- Caguana, A. L. G. et al., (2022). Mundos virtuales y su influencia en la motivación por el aprendizaje. *Revista Científica*, vol. 7, No. 24, 136-158 pp. [pdf], e-ISSN: 2542-2987. DOI:<https://doi.org/10.29394/Scientific.issn.2542-2987.2022.7.24.7.136-158>
- Carrasco, M., Mendoza, M. A., Juárez, C. e Ibarra, J. R. S. (2022). Propuesta de un Simulador Virtual para la enseñanza aprendizaje de los Medios Alternos de Solución de Conflictos (MASC) en México, *Ciencia Latina Revista Multidisciplinar*, Vol. 6, No. 6, 55-74 pp. DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6
- Carrasco, M., Mendoza, M. A., Juárez, C. e Ibarra, J. R. S. (2023b). Diseño de un videojuego y su modelado para la implementación de la enseñanza-aprendizaje de los medios alternos de solución de conflictos (MASC) en México. *Ciencia Latina Revista Multidisciplinar*, Marzo-Abril 2023, Vol. 7, No. 2, 7004-7028 pp. DOI: 10.37811/cl_rcm.v7i2.5842
- Carrasco, M., Mendoza, M. A., Juárez, C. e Ibarra, J. R. S. (2023c). Modelos Teóricos Locales (MTL) y su Implementación en la Enseñanza-Aprendizaje de los Medios Alternos de Solución de Conflictos (MASC) en México, *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, noviembre-diciembre 2023, Vol. 7, No 6, pp. 5308-5330. DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i6.9084
- Carrasco, M., Mendoza, M. A., Juárez, C. e Ibarra, J. R. S. (2024a). Videojuegos educativos como herramienta didáctica y su implementación en la enseñanza-aprendizaje del derecho, *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, septiembre-octubre 2024, Vol. 8, No 5, pp. 7770-7787 [pdf], https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14193
- Carrasco, M., Mendoza, M. A., Juárez, C. e Ibarra, J. R. S. (2024b). Analysis of cognitive processes applying virtual reality for the teaching-learning of Alternative Dispute Resolution (ADR) in México, *REDU. Revista de Docencia Universitaria*, Vol. 22, No 2, julio-diciembre 2024, pp. 62-84 [pdf], <https://doi.org/10.4995/redu.2024.21804>
- Farfán, I. J. L., et al., (2023). Inteligencia artificial y Derecho: ¿La justicia en manos de la IA?, *Revista de Filosofía Jurídica, Social y Política*, ISSN 1315-6268, Vol. 30, N° 2, 2023: 173-197 pp. DOI: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9073874>
- García, L. X. J. (2022). *Sistemas de ecuaciones lineales en el nivel Medio Superior: estudio de casos mediante Modelos Teóricos Locales*, [Tesis de Doctorado, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Matemática Educativa], México, 300 pp. <https://repositorio.cinvestav.mx/bitstream/handle/cinvestav/4047/SSIT0019013.pdf?sequence=1>
- González, G. J. (2012). El constructivismo pedagógico aplicado al derecho: Hacia una formación dinámica, *Boletín Mexicano de Derecho Comparado*, nueva serie, año XLV, No 133, pp. 119-139 <https://www.scielo.org.mx/pdf/bmdc/v45n133/v45n133a4.pdf>
- Frank, Mila, et al., (2022). Estrategias para la enseñanza andragógica del derecho en contextos virtuales. *Formación Universitaria*. Vol. 15, No. 2, 2022, pp. 61-70 [pdf], <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062022000200061> [consulta: 3 de abril de 2024].
- Libro Blanco de la Comisión Europea sobre Inteligencia Artificial titulado "Una aproximación europea a la excelencia y a la confianza" COM (2020), 65,1-32 pp. [en línea], final <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0065> [Consulta: 11 de enero de 2024].
- Mendoza, P. M. A. (2024). Modelo teórico local para la enseñanza-aprendizaje de la Robótica con apoyo de la realidad aumentada, *ResearchGate*, febrero 2024, pp. 87-99 [pdf], <https://www.researchgate.net/publication/377894830>
- Paulo Freire, (Wikipedia), Wikipedia enciclopedia libre [en línea] https://es.wikipedia.org/wiki/Educaci%C3%B3n_bancaria# [consulta 15 de abril de 2025]
- Sandoval-Poveda, Ana María & Tabash-Perez, Farith, (2021). Realidad virtual como apoyo innovador en la educación a distancia", *Revista Innovaciones Educativas*, Vol. 23, No. Especial, octubre 2021, pp. 120-132 [pdf], DOI: <https://doi.org/10.22458/ie.v23iespecial.3622> [consulta: 3 de abril de 2024].
- Valencia, C. S. & Suárez, G. Y. D. (2023). Uso pedagógico de tecnologías en la enseñanza del derecho de la Universidad de San Buenaventura Medellín, *Revista Científica UISRAEL*, Vol. 10, No1, 61-80 pp. DOI: 10.35290/rcui.v10n1.2023.676

Fotografías

<https://thermohuman.com/es/2022/04/26/se-puede-medir-la-fatiga-neuromuscular-con-la-termografia-en-atletas>

Diseño de un Modelo Predictivo con Inteligencia Artificial y Sistemas de Información Geográfica para la Gestión de Incendios Forestales

Samuel Efrén Viñas Álvarez¹, Claudia Teresa González Ramírez²,
Gabriel Mora Patiño³, José Luis Martínez Alcántar⁴

Acerca de los autores

^{1,2,3,4} Tecnológico Nacional de México
/ Instituto Tecnológico de Zitácuaro,
Laboratorio Nacional CONAHCYT en
Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos.



Resumen

Este estudio presenta el diseño de un modelo predictivo que integra técnicas de Inteligencia Artificial (IA) y Sistemas de Información Geográfica (SIG, por sus siglas en inglés GIS) para anticipar y mitigar incendios forestales en la región Oriente del Estado de Michoacán, México. Se desarrolló una red neuronal del tipo Perceptrón Multicapa (MLP), entrenada con datos históricos de incendios, variables geográficas, operativas y ecológicas del territorio. El modelo alcanzó un coeficiente de determinación (R^2) de 0.376 y un AUC de 0.723, lo que evidencia una capacidad razonable para estimar la superficie afectada y diferenciar escenarios de mayor susceptibilidad. La plataforma resultante, que incorpora visualización cartográfica interactiva, permite apoyar decisiones estratégicas en la gestión del riesgo ambiental. Esta herramienta tecnológica representa una solución inicial, accesible y replicable con potencial para ser fortalecida con nuevas variables y metodologías, consolidándose como un apoyo útil para la planificación territorial sostenible en contextos vulnerables.

Palabras clave: Incendios forestales, predicción ambiental, redes neuronales artificiales, variables meteorológicas.

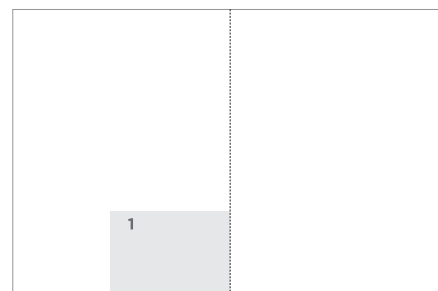
Abstract

This study presents the design of a predictive model that integrates Artificial Intelligence (AI) techniques and Geographic Information Systems (GIS) to anticipate and mitigate forest fires in the Eastern region of Michoacán, Mexico. A Multilayer Perceptron (MLP) neural network was developed and trained using historical fire data, along with geographic, operational, and ecological variables of the territory. The model achieved a coefficient of determination (R^2) of 0.376 and an AUC of 0.723, demonstrating a reasonable capacity to estimate the affected area and differentiate scenarios of higher susceptibility. The resulting platform, which incorporates interactive cartographic visualization, supports strategic decision-making in environmental risk management. This technological tool represents an initial, accessible, and replicable solution with the potential to be strengthened through the inclusion of new variables and methodologies, consolidating its role as a valuable aid for sustainable territorial planning in vulnerable contexts.

Keywords: Forest fires, environmental prediction, artificial neural networks, meteorological variables.

Introducción

Los incendios forestales representan una amenaza creciente para los ecosistemas y la seguridad humana, intensificada por el cambio climático y la expansión de actividades antropogénicas. En Michoacán, particularmente en su región oriente, estos fenómenos se han intensificado, afectando la biodiversidad, los recursos naturales y la calidad del aire. A pesar de los esfuerzos institucionales, la prevención y gestión de incendios sigue siendo limitada por la falta de herramientas predictivas basadas en datos. En este contexto, los modelos de Inteligencia Artificial (IA) combinados con Sistemas de Información Geográfica (GIS) surgen como alternativas innovadoras que permiten anticipar escenarios de riesgo y optimizar la asignación de recursos. Diversos estudios internacionales han validado la eficacia de algoritmos como Random Forest, Support Vector Machine, y redes neuronales profundas (CNN y RNN).



<https://www.gaceta.unam.mx/trabajan-con-ia-en-deteccion-de-humo-generado-por-incendios-forestales/>

Sin embargo, en regiones como la analizada con pocos recursos tecnológicos, existe una brecha en cuanto a modelos operativos validados, lo que motivó a realizar esta investigación. Como se mencionó anteriormente, los incendios forestales representan una amenaza crítica y creciente para los ecosistemas naturales en la región oriente de Michoacán. Su frecuencia e intensidad han aumentado debido al cambio climático, el incremento de las temperaturas globales, la variabilidad de las precipitaciones, así como por el avance de la deforestación, la expansión agrícola y la ocupación irregular del territorio (Neger *et al.*, 2022; González R. & Ortiz P., 2022). La zona oriente de Michoacán se ha convertido en una de las zonas más vulnerables por su configuración topográfica, su riqueza biológica y la presión antrópica ejercida por la agricultura de temporal, la ganadería extensiva y la tala ilegal (Bassaber Zuñiga *et al.*, 2024; España Boquera *et al.*, 2024).

Frente a este escenario, el uso de IA combinada con GIS se presenta como una alternativa estratégica para anticipar, mitigar y gestionar eficazmente los incendios forestales (González Gutiérrez *et al.*, 2023; Cruz Núñez & Bulnes Aquino, 2019). La IA permite desarrollar modelos predictivos con capacidad para detectar patrones complejos entre variables ambientales, meteorológicas y geoespaciales. Los GIS, por su parte, ofrecen un marco visual y espacial que facilita la toma de decisiones territorialmente informadas (Flores Garnica, 2021).

A nivel internacional, estudios recientes han evidenciado la efectividad de diferentes algoritmos de aprendizaje automático y profundo en la predicción y caracterización de incendios forestales. Alkhatib *et al.*, (2023) realizaron una revisión exhaustiva donde se destacan los modelos Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM), redes neuronales artificiales (ANN), y sus variantes profundas como las Convolutional Neural Networks (CNN) y Recurrent Neural Networks (RNN). Moghim y Mehrabi (2024), a través de un análisis multirregional, confirmaron la alta precisión del modelo RF al clasificar zonas de riesgo con base en variables como NDVI, pendiente, temperatura y uso del suelo. En India, Pati *et al.* (2024) aplicaron modelos SVM y RF sobre 19 variables ambientales y geoespaciales, logrando una clasificación con AUC superior al 94%.

Desde el enfoque del aprendizaje profundo, Andrianarivony y Akhloufi (2024) demostraron que las redes convolucionales y recurrentes son especialmente útiles para integrar dinámicas espacio-temporales derivadas de imágenes satelitales multitemporales, mejorando la predicción del comportamiento del fuego. En México, investigaciones como las de Ibarra Montoya & Huerta Martínez (2016) y Vilchis Francés *et al.* (2015) han desarrollado modelos de predicción basados en proyecciones climáticas y parámetros ecológicos locales. Por su parte, Pérez Bertozzi *et al.* (2024) y Román Cuesta & Martínez Vilalta (2006) destacan el papel de las áreas protegidas y el manejo integral del fuego como elementos fundamentales en la mitigación de estos eventos.

La literatura también subraya la relación entre factores sociales y ambientales en la incidencia de incendios. Huerta Silva *et al.* (2024) encontraron que la pobreza rural y la falta de alternativas económicas sostenibles favorecen prácticas como la quema de tierras, aumentando la vulnerabilidad. Además, las instituciones como CONABIO (2024) y CONAFOR (2024) advierten sobre el riesgo creciente en zonas con valor ecológico prioritario y la necesidad urgente de implementar sistemas de alerta temprana con base científica.

Asimismo, estudios como el de Martínez Saucedo & Ezequiel Inchausti (2023), Santelices Moya *et al.* (2022), y Silva *et al.* (2023), han demostrado que la

integración de sensores remotos, GIS y plataformas como Google Earth Engine permite monitorear en tiempo real la propagación de incendios y apoyar la toma de decisiones con mapas dinámicos.

1. Procedimiento

Se empleó un enfoque cuantitativo-experimental, basado en cinco fases. Primero, se integraron fuentes de datos (como reportes regionales y registros municipales) correspondientes al periodo 2015-2024, generando un *dataset* consolidado con variables geográficas, ecológicas y operativas principalmente. Se identificaron variables principales para iniciar con el estudio, como la duración del incendio, latitud, longitud, tipo de incendio, vegetación e impacto y causa probable. Posteriormente, se realizó un preprocesamiento que incluyó limpieza de datos, conversión de formatos y codificación de variables categóricas. El modelo predictivo fue una red neuronal del tipo Perceptrón Multicapa (MLP) con dos capas ocultas de 16 y 8 neuronas, respectivamente, función de activación ReLU y entrenamiento mediante el optimizador Adam. La validación se realizó con una división del 70% de los datos para entrenamiento y 30% para prueba. Finalmente, se generaron visualizaciones en un visor cartográfico con Leaflet JS y QGIS.

1.1. Fase 1. Recolección y preprocesamiento de datos.

Se recopilaron datos históricos de incendios forestales registrados entre los años 2015 y 2024 provenientes de la CONAFOR y bases de datos geoespaciales públicas. Algunas de las primeras variables analizadas incluyen temperatura media, precipitación acumulada, velocidad del viento, humedad relativa, elevación, pendiente, tipo de cobertura vegetal, uso del suelo, NDVI, densidad de caminos, distancia a poblaciones y densidad de incendios previos. Las capas geoespaciales fueron integradas y estandarizadas en formato raster mediante herramientas como QGIS y Google Earth Engine.

1.2. Fase 2. Selección de variables

En primer lugar, se llevó a cabo un análisis exploratorio de datos (EDA), mediante el cual se evaluaron las distribuciones individuales de cada variable mediante histogramas y diagramas de caja, con el objetivo de identificar sesgos, asimetrías y valores atípicos. Se calcularon estadísticas descriptivas como media, mediana, desviación estándar y coeficientes de curtosis y asimetría. Además, se analizaron patrones multivariados mediante gráficos de dispersión y mapas de calor. Se corrigieron o imputaron los valores faltantes mediante interpolación lineal o sustitución por medidas de tendencia central. Posteriormente, se aplicó un análisis de correlación de Pearson para evaluar la relación lineal entre pares de variables numéricas. Aquellas con una correlación superior a 0.85 fueron consideradas redundantes. En estos casos, se conservaron las variables más interpretables o con mejor calidad de medición. Finalmente, se utilizó el Análisis de Componentes Principales (PCA) como técnica de reducción de dimensionalidad. Para ello, las variables fueron previamente estandarizadas con el fin de garantizar una contribución equitativa al modelo. A continuación, se calcularon los componentes principales, ordenados según su varianza explicada. Se seleccionaron aquellos componentes que explicaban al menos el 90% de la varianza acumulada, lo que permitió trabajar con un conjunto compacto de datos sin pérdida significativa de información.

1.3. Fase 3. Diseño del modelo predictivo

El modelo predictivo se desarrolló utilizando una red neuronal artificial del tipo Perceptrón Multicapa (MLP), una arquitectura supervisada y feedforward ampliamente empleada para tareas de regresión no lineal. Su propósito fue estimar la superficie potencialmente afectada por incendios forestales a partir de un conjunto multivariado de factores geográficos, operativos y ecológicos.

El diseño del modelo incluyó los siguientes componentes:

- a) Capa de entrada: Compuesta por 6 nodos, correspondientes a las variables seleccionadas por su impacto: duración del incendio (en días), latitud, longitud, tipo de incendio, tipo de vegetación y tipo de impacto.
- b) Capas ocultas: Se implementaron dos capas ocultas:
 - i. La primera capa con 16 neuronas.
 - ii. La segunda capa con 8 neuronas.
 - iii. Ambas utilizan la función de activación ReLU (Rectified Linear Unit), que permite capturar relaciones no lineales y mitigar el problema del gradiente desvanecido en el entrenamiento.
- c) Capa de salida: Constituida por una sola neurona con función de activación lineal, adecuada para generar una predicción continua de la superficie estimada afectada por un incendio, expresada en hectáreas.

El entrenamiento del modelo se realizó utilizando el optimizador Adam, un algoritmo eficiente para problemas con múltiples parámetros y datos heterogéneos. La función de pérdida empleada fue el Error Cuadrático Medio (MSE). El conjunto de datos fue dividido en 70% para entrenamiento y 30% para prueba, asegurando una evaluación robusta del rendimiento. Finalmente, el modelo se puede ver representado en (1).

$$\hat{y} = W^{(3)} \cdot \text{ReLU}(W^{(2)} \cdot \text{ReLU}(W^{(1)} \cdot x + b^{(1)}) + b^{(2)}) + b^{(3)} \quad (1)$$

Donde:

- x : Vector de entrada con las 6 variables seleccionadas.
- $W(i)$: Matriz de pesos de la capa i .
- $b(i)$: Vector de sesgo (bias) correspondiente a la capa i .
- $\text{ReLU}(z)$: Función de activación ReLU, definida como $\text{ReLU}(z) = \max(0, z)$.
- $\hat{y}$: Valor estimado de salida, en este caso la superficie afectada por incendios (en hectáreas).

1.4. Fase 4. Evaluación del modelo

El rendimiento del modelo se evaluó mediante métricas clásicas de regresión, incluyendo el Error Cuadrático Medio (MSE), la Raíz del Error Cuadrático Medio

(RMSE) y el Coeficiente de Determinación (R^2), con el fin de medir la precisión en la predicción de la superficie afectada por incendios. Adicionalmente, se analizó la capacidad del modelo para discriminar entre zonas de baja y alta afectación mediante una evaluación binaria. Para ello, se construyó una curva ROC a partir de un umbral mediano, y se calculó el área bajo la curva (AUC), lo cual permitió evaluar su rendimiento en escenarios de clasificación de susceptibilidad. En la Figura 1 se presentan las gráficas de predicción vs real, distribución de errores residuales y curva ROC.



Figura 1

Gráficas de evaluación del modelo MLP. Elaboración propia.

1.5. Fase 5. Integración geoespacial

La integración geoespacial de los resultados obtenidos por el modelo predictivo constituye una fase crucial para su aplicación práctica. A través del uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (GIS) y del diseño propuesto, los valores estimados de superficie afectada fueron georreferenciados y convertidos en capas raster y vectoriales, lo que permite su visualización e interpretación espacial de manera efectiva.

Se utilizó QGIS como entorno principal para la integración cartográfica, combinando datos topográficos, de cobertura vegetal, y variables antrópicas con las salidas del modelo. Estas capas fueron organizadas en un visor temático que facilita la identificación de zonas de riesgo, la priorización de acciones de mitigación y la definición de estrategias de intervención. Además, se desarrolló un visor interactivo basado en Leaflet JS para su publicación web, lo que permite que autoridades forestales, tomadores de decisiones y comunidades locales accedan a la información de forma dinámica y en tiempo real.

Entre las funcionalidades del visor destacan la consulta de zonas de alta susceptibilidad, la generación de mapas temáticos de severidad, la delimitación de rutas de evacuación y el análisis multicriterio para la priorización territorial. En la Figura 2 se muestran las pantallas principales del sistema, el mapa global en el que si hay incendios registrados se indicará su ubicación e información, con sus áreas afectadas, y el menú de navegación. La ubicación de las reservas que se encuentran al cuidado de las diferentes empresas e instituciones.

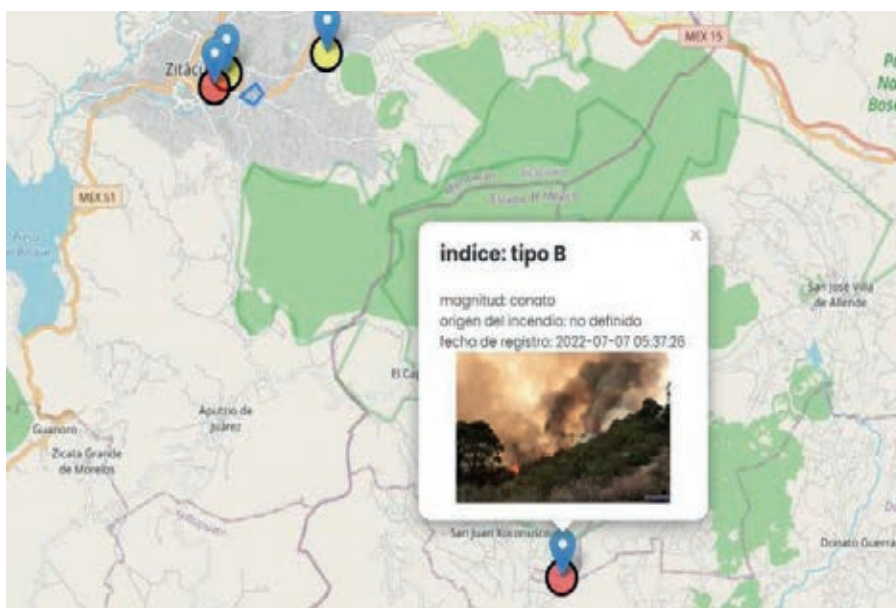


Figura 2

Pantalla de estatus inicial.

En la Figura 3 se puede observar la información del incendio en estatus de inicio.

2. Resultados

Los resultados obtenidos con el modelo predictivo propuesto evidencian una capacidad aceptable para estimar la superficie potencialmente afectada por incendios forestales, a partir de un conjunto de variables geográficas, ecológicas y operativas de la región oriente de Michoacán.

El modelo alcanzó un coeficiente de determinación (R^2) de 0.376 y una raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 73.48 hectáreas, lo que indica un rendimiento moderado pero consistente, dadas las características no lineales y la alta variabilidad del fenómeno. Asimismo, la curva ROC mostró un área bajo la curva (AUC) de 0.72, lo cual refleja una capacidad adecuada para discriminar entre zonas de baja y alta afectación mediante una evaluación binaria basada en la mediana de superficie.

Estas métricas, complementadas con los mapas temáticos generados a partir de la salida del modelo, constituyen una herramienta operativa para la gestión territorial y la toma de decisiones en el ámbito de protección civil y conservación ambiental. La visualización geoespacial de los resultados permite identificar zonas prioritarias y diseñar estrategias proactivas de mitigación.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio respaldan la viabilidad inicial de un modelo predictivo basado en redes neuronales tipo Perceptrón Multicapa (MLP) para estimar la superficie afectada por incendios forestales en la región oriente del estado de Michoacán, México. A partir de variables geográficas, ecológicas y operativas disponibles, el modelo demostró un rendimiento

aceptable, alcanzando un coeficiente de determinación (R^2) de 0.376 y un área bajo la curva (AUC) de 0.72. Estas métricas reflejan una capacidad predictiva útil en escenarios de gestión de riesgo, particularmente en entornos con recursos técnicos limitados.

Este trabajo debe considerarse como una primera etapa de diseño, en la que se priorizó la simplicidad estructural y la eficiencia operativa. El modelo MLP destaca por su equilibrio entre precisión, facilidad de implementación y bajo costo computacional, lo que lo hace especialmente accesible para su adopción por instituciones locales. Su integración con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (GIS) y plataformas interactivas como Leaflet JS refuerza su aplicabilidad práctica y su potencial de uso por autoridades forestales, tomadores de decisiones y comunidades vulnerables. No obstante, existen diversas rutas para mejorar la eficiencia y capacidad predictiva del modelo. Entre las alternativas a explorar en futuras fases del proyecto se incluyen:

- Incorporar variables meteorológicas dinámicas en tiempo real mediante API externas.
- Integrar indicadores topográficos, de vegetación y NDVI extraídos de imágenes satelitales de alta resolución y/o drones.
- Evaluar arquitecturas híbridas que combinen MLP con redes convolucionales (CNN) o redes recurrentes (RNN) para capturar patrones espacio-temporales complejos.
- Aplicar técnicas de ensamblado (ensemble learning) que combinen MLP con modelos como Random Forest o XGBoost.
- Incluir variables socioeconómicas y de vulnerabilidad para una evaluación de riesgo más integral y territorializada.
- Validar los nuevos avances del modelo y la plataforma de visualización en pruebas piloto con instancias de protección civil y brigadas comunitarias.

En suma, este estudio representa un aporte metodológico y aplicado a la predicción de incendios forestales mediante Inteligencia Artificial y Sistemas de Información Geográfica.

Referencias

- Alkhatib, R., Sahwan, W., Alkhatieb, A., & Schütt, B. (2023). A brief review of machine learning algorithms in forest fires science. *Applied Sciences*, 13(14), 8275. <https://doi.org/10.3390/app13148275>
- Andrianarivony, H. S., & Akhloufi, M. A. (2024). Machine learning and deep learning for wildfire spread prediction: A review. *Fire*, 7(12), 482. <https://doi.org/10.3390/fire7120482>
- Bassaber Zúñiga, A. I., Maldonado Villegas, M. M., Curiel Guevara, S., Rojas Arias, M. L., & Valdez Rosas, J. S. (2024). Revisión de causas, consecuencias y medidas de respuesta frente a los incendios forestales: Un enfoque en el estado de Jalisco. *Revista Científica e-cucba*, (21), 100-114. <https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi21.327>
- CONABIO. (2024). *Áreas protegidas*. Biodiversidad Mexicana. <https://www.biodiversidad.gob.mx/region/areasprot>
- CONAFOR. (2024). *Reporte semanal de incendios*. Comisión Nacional Forestal. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/reportesemanal-de-incendios>
- Cruz Núñez, X., & Bulnes Aquino, E. (2019). Emission impact of wildfires: El Tepozteco 2016. *Atmósfera*, 32(2), 85-93. <https://doi.org/10.20937/ATM.2019.32.02.01>
- España Boquera, M., Champo Jiménez, O., & Uribe Salas, M. (2024). Extensión y severidad de incendios forestales en Michoacán en 2021 a partir de imágenes Sentinel-2. *Polibotánica*, 57, 125-144. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.57.7>
- Flores Garnica, J. G. (2021). Antecedentes y perspectivas de la investigación en incendios forestales en el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(Especial-1). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.981>
- González Gutiérrez, I., Farfán Gutiérrez, M., Morales Manilla, L. M., Pérez Salicrup, D. R., Garza Saldaña, J. J., & Medina Puente, A. (2023). Índices y modelos para la predicción de la ocurrencia de incendios forestales: Una revisión para México. *Revista Geográfica de América Central*, 2(71), 193-219. <https://doi.org/10.15359/rgac.71-2.7>
- Huerta Silva, M. H., Parra Vázquez, M. R., & Ianni, E. (2024). Relación entre pobreza y conservación del capital natural desde los medios de vida sustentables en Villaflores, Chiapas. *Revista de Ciencias Ambientales*, 58(1), 19352. <https://doi.org/10.15359/rca.58-1.9>
- Ibarra Montoya, J. L., & Huerta Martínez, F. M. (2016). Cambio climático y predicción de incendios al 2050 en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 39-50. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i37.50>
- Martínez Saucedo, A., & Ezequiel Inchausti, P. (2023). Predicción de incendios forestales mediante modelos de machine learning. En XXVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/149568>
- Moghim, S., & Mehrabi, M. (2024). Wildfire assessment using machine learning algorithms in different regions. *Fire Ecology*, 20, 104. <https://doi.org/10.1186/s42408-024-00335-2>
- Pérez Bertozzi, L., Vega Araya, M., Díaz Orias, J., & Guadamuz Eras, D. (2024). Efectos ambientales de eventos hidrometeorológicos extremos y su incidencia en el manejo del fuego. *Revista de Ciencias Ambientales*, 58(1). <https://doi.org/10.15359/rca.58-1.12>
- Román Cuesta, R. M., & Martínez Vilalta, J. (2006). Effectiveness of protected areas in mitigating fire: Case study of Chiapas. *Conservation Biology*, 20(4), 1074-1086. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00478.x>
- Santelices Moya, R., Cabrera Ariza, A., Silva Flores, P., & Navarro Cerrillo, R. M. (2022). Assessment of a wildfire in *Nothofagus alessandrii* forests based on Sentinel-2. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 49(2), 85-96. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v49i2.2337> https://es.wikipedia.org/wiki/Educaci%C3%B3n_bancaria# [consulta 15 de abril de 2025]
- Sandoval-Poveda, Ana María & Tabash-Perez, Farith, (2021). Realidad virtual como apoyo innovador en la educación a distancia", *Revista Innovaciones Educativas*, Vol. 23, No. Especial, octubre 2021, pp. 120-132 [pdf], DOI: <https://doi.org/10.22458/ie.v23iespecial.3622> [consulta: 3 de abril de 2024].
- Valencia, C. S. & Suárez, G. Y. D. (2023). Uso pedagógico de tecnologías en la enseñanza del derecho de la Universidad de San Buenaventura Medellín, *Revista Científica UISRAEL*, Vol. 10, No1, 61-80 pp. DOI: 10.35290/rcui.v10n1.2023.676

Fotografías

<https://www.gaceta.unam.mx/trabajan-con-ia-en-deteccion-de-humo-generado-por-incendios-forestales/>

Integración de las Tecnologías Geoespaciales en Programas de Ingeniería

Laura Mercedes Arteaga Rojas¹, Sergio Gonzalez Gil²
Griselda Cortés Barrera³



Acerca de los autores

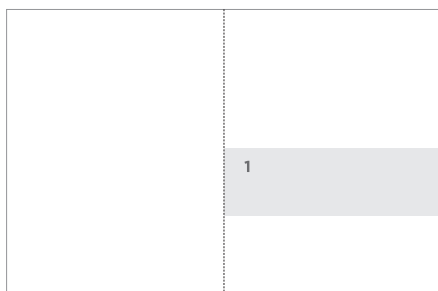
¹ Docente/Escuela TIC, Magister en Educación, Politécnico Gran Colombiano, Bogotá, Colombia.

² Docente/Facultad de Ingeniería, Magister Administración de Empresas, Corporación Minuto de Dios, Bogotá, Colombia.

³ Doctorado Computer Systems, Laboratorio Nacional Conahcyt en Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos (LNC-IACD), Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Estado de México.

Resumen

Las tecnologías geoespaciales, con datos de drones y satélites, permiten a la comunidad universitaria abordar el cambio climático y el estado territorial, especialmente en la producción de arroz. La integración en programas de Ingeniería de Datos y Sistemas es clave. Se estudiaron cultivos de arroz en México, Costa de Marfil y Colombia, procesando imágenes satelitales y datos de drones con herramientas TIC como Google Earth Engine y Copernicus. Cien estudiantes desarrollaron habilidades en procesamiento de imágenes y cálculo de índices de vegetación (NDVI). Un estudio en Colombia mostró una mejora del NDVI proyectada para 2046. Los resultados educativos evidenciaron una alta integración con Python, soluciones ambientales,



<https://www.telematica.com.pe/para-encontrar-el-exito-en-la-industria-geoespacial-comprometase-constantemente/>

comprensión ecológica y motivación, con una percepción estudiantil muy favorable.

Palabras clave: Integración de las Tecnologías de drones y satélite en las aulas de clase, Imágenes Satelitales, Índices de vegetación, Educación, Tecnologías Geoespaciales.

Abstract

Geospatial technologies, with drone and satellite data, enable the university community to address climate change and territorial status, especially in rice production. Integration into Data and Systems Engineering programs is key. Rice crops were studied in Mexico, the Ivory Coast, and Colombia, processing satellite images and drone data with ICT tools such as Google Earth Engine and Copernicus. One hundred students developed skills in image processing and calculating vegetation indices (NDVI). A study in Colombia showed a projected improvement in NDVI by 2046. The educational outcomes demonstrated a high level of integration with Python, environmental solutions, ecological understanding, and motivation, with a highly favorable student perception.

Keywords: Integration of drone and satellite technologies in classrooms, Satellite images, Vegetation indices, Education, Geospatial technologies.

Introducción

El avance tecnológico ha transformado el mundo y la sociedad. Las herramientas tecnológicas para la recopilación de datos han permitido a los investigadores documentar recursos naturales, usando modelos para comprender las tendencias espaciales y temporales de la vegetación, y la estructura y fragmentación de los ecosistemas terrestres. Las tecnologías geoespaciales incluyen herramientas para capturar, almacenar, procesar, analizar, visualizar y compartir información geográfica. Esto abarca SIG, GPS, geocercas, sensores IoT, drones y teledetección. Los drones han crecido exponencialmente, transformando la guerra al hacerla impersonal. Su uso bélico impulsó su masificación y reducción de costos en áreas como vigilancia, monitoreo de cultivos, detección de objetos (conteo de ganado), topografía, gestión de desastres, fumigación y educación.

Un estudio en Cianjur, Java Occidental (Wijayanto *et al.*, 2024), utilizó drones con sensores multiespectrales y térmicos para detectar la enfermedad Bacterial Leaf Blight (BLB) en cultivos de arroz. Aplicaron análisis textural y algoritmos de aprendizaje automático (Random Forest y redes neuronales artificiales), logrando una precisión del 0.984. La integración de características texturales y datos térmicos mejoró la detección temprana de BLB, ofreciendo una herramienta robusta, no invasiva y rentable para la gestión agrícola y la seguridad alimentaria. Este estudio es aplicable al ámbito educativo gracias a sus métricas, algoritmos y modelos.

Por otro lado, en el ámbito educativo, son pocos los estudios hechos en la transversalización de los conocimientos sobre el uso de los datos adquiridos por drones. Y por esa razón, resulta fundamental para enriquecer las estrategias de enseñanza, y particularmente en lo que respecta a la aproximación al mundo geográfico mediante conceptos disciplinares fundamentales.

La motivación estudiantil en el ámbito educativo, especialmente en la transdisciplinariedad de ingenierías, es un reto. Las tecnologías geoespaciales,

con datos de satélites y drones, permiten a los estudiantes analizar territorios, promoviendo impacto social y mitigación de riesgos. Un ejemplo exitoso es la capacitación para la producción de arroz en Colombia. Surge la pregunta: ¿Cómo transferir conocimiento sobre el estado ecológico y agrícola de los cultivos de arroz en México, Costa de Marfil y Colombia a estudiantes universitarios, usando datos geoespaciales de drones y satélites, para fomentar la sostenibilidad y seguridad alimentaria?

Se propone integrar el uso de datos geoespaciales de imágenes satelitales y de drones en programas educativos de ingeniería de datos, software y sistemas en universidades como el TESE (México), IUTEA (Costa de Marfil) y la Corporación el Minuto de Dios (Colombia). Estas tecnologías complementarán asignaturas como bases de datos relacionales, minería de datos e ingeniería de software, permitiendo un análisis profundo del estado ecológico, social, económico y agrícola de los cultivos de arroz en territorios cercanos a cada institución. Esto contribuirá a una gestión más sostenible mediante la captura de imágenes con drones, su procesamiento en plataformas geoespaciales y la aplicación de modelos de aprendizaje automático para la detección de enfermedades y el monitoreo de cultivos.

Manolucos y Vazquez (2014) destacan la relevancia de vincular tecnologías geoespaciales con la educación superior y fomentar la autonomía e investigación en el ámbito universitario, incluyendo la participación estudiantil en el análisis de datos territoriales. Esto se alinea con el modelo de aprendizaje por descubrimiento del currículo de Geografía K-12 de EE. UU. (Geography for Life, 1994), basado en cinco actividades: preguntar, adquirir, organizar, analizar y responder con información geográfica (González, 2015).

Además, estas tecnologías complementan las carreras de ingeniería de sistemas, ciencia de datos y software, ya que en el futuro podrían desarrollar aplicaciones multiplataforma para visualizar datos en tiempo real de topografía, estado fitosanitario del arroz, curvas de nivel, detección de árboles y casas, entre otras funciones. (Arteaga *et al.*, 2024).

1. Metodología

La metodología combina un enfoque descriptivo-experimental con tecnologías geoespaciales (Google Earth Engine, Copernicus, LandViewer, OpenAerialMap, drones) y análisis de percepción en estudiantes de ingeniería de Colombia, México y Costa de Marfil. El objetivo es que los estudiantes adquieran habilidades para evaluar el estado vegetativo de cultivos de arroz usando imágenes satelitales y de drones, calculando índices como NDVI y aplicando regresión lineal y aprendizaje automático.

1.1 Etapas del Proceso Metodológico

A continuación se pueden apreciar cada una de las fases del modelo propuesto del uso de las tecnologías geoespaciales y en particular los datos abiertos de , capturados y analizados de los drones y datos satelitales, aplicadas en la educación superior, observar Figura 1.

La primera fase implica la adquisición y procesamiento de datos satelitales y de drones. Estos datos son vitales para analizar la cobertura del suelo en la producción de arroz, utilizando información de sensores satelitales, especialmente bandas multiespectrales como NIR y SWIR, cruciales para calcular índices que evalúan la vegetación. **NDVI (Índice de Vegetación de**

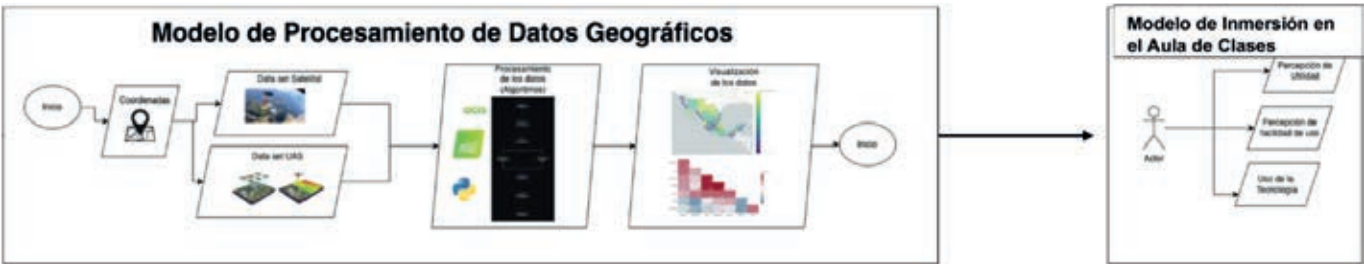


Figura 1

Modelo de procesamiento de datos geográficos e integración educativa.

Diferencia Normalizada): utilizado para medir la salud de la vegetación y su capacidad fotosintética.

Además, se utilizan drones con cámaras RGB para monitoreos locales. Las imágenes revelan cambios en la vegetación y el suelo. Los datos geoespaciales combinan tecnologías satelitales y UAS, procesándose con herramientas TIC para el tratamiento de imágenes. Los datos en píxeles se someten a procesamiento digital y multitemporal para correlacionar la información de ambas fuentes. Se calculan índices de vegetación y variables climatológicas para analizar el estado actual de los cultivos. Se implementan modelos de regresión lineal para identificar tendencias y pronosticar cambios ecológicos. Los puntos de coordenadas de cada territorio se ubican satelitalmente para identificar necesidades y el estado histórico. Ver Tabla 1.

TABLA 1.
COORDENADAS DE LOS TERRITORIOS.

Nombre Territorio	País	Coordenadas Latitud	Coordenadas Longitud
Tierra Alta	Colombia	-75.85244711233833	8.809663662096197
San Blas o Tepic en México	México	-101.21284567674768	20.121594097080365
Sakassou	Costa de Marfil	-5.314842755697509,	7.472049619395599
Lérida	Colombia	-74.918626	4.851545

Luego, se aplican algoritmos avanzados de Machine Learning para análisis predictivos y visualizaciones que muestran patrones actuales y proyecciones futuras de los territorios. Los resultados se presentan en mapas y gráficos de datos históricos, facilitando la interpretación y la toma de decisiones informadas.

Los estudiantes presentan sus hallazgos sobre sostenibilidad y manejo de cultivos de arroz, mostrando cómo los datos se traducen en acciones prácticas para productores y comunidades.

Se evalúa la integración de datos de drones y satélites, según la percepción de los estudiantes de ingeniería, en cuanto a la eficiencia y eficacia del uso

de TIC y plataformas geoespaciales como Google Earth Engine y Copernicus. Esto depende de la calidad, conectividad, planificación y estrategias de transferencia de conocimientos.

Las plataformas geoespaciales permiten a los estudiantes extraer, gestionar, transformar, analizar, visualizar y tomar decisiones con datos geoespaciales, complementando las carreras universitarias de computación. Esto les da una comprensión más profunda del contexto territorial, basada en la teoría unificada y la Tecnología de Aceptación.

2. Resultados

La primera fase muestra el procesamiento de datos geográficos del índice de vegetación normalizada (NDVI) de satélites SENTINEL 2, MODIS y Landsat 5, 7 y 8, combinados estadísticamente. Se investigan las coordenadas de latitud y longitud de piscinas de producción de arroz y se combinan las bandas para hallar índices de vegetación. Las imágenes resultantes son de baja calidad, lo que destaca la importancia de la información de UAS (DRONES). Ver Figuras 2 y 3, y mapas y datasets satelitales.

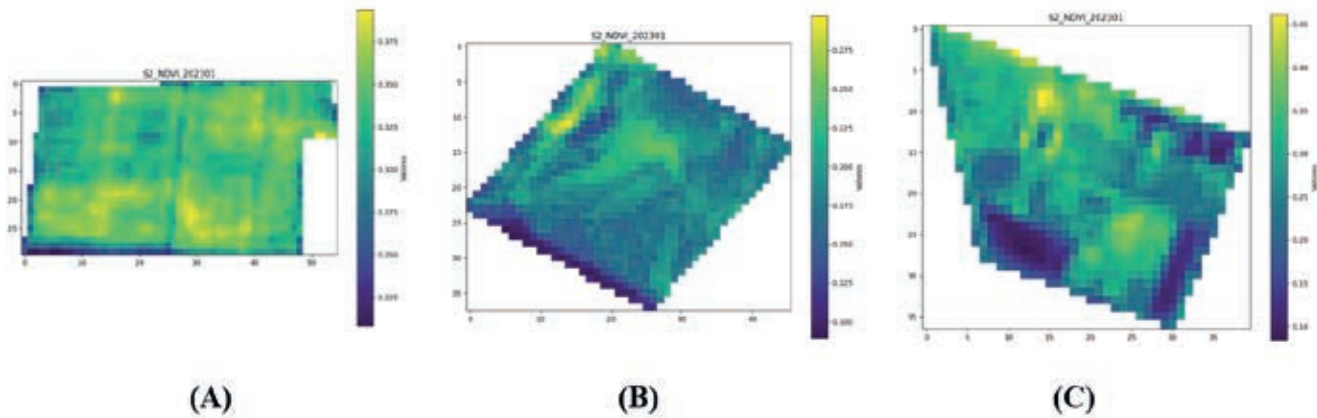


Figura 2

Mapa del índice de vegetación normalizado NDVI. (A) San Blas o Tepic en México. (B) Sakassou en Costa de Marfil. (C) Tierra Alta en Colombia.

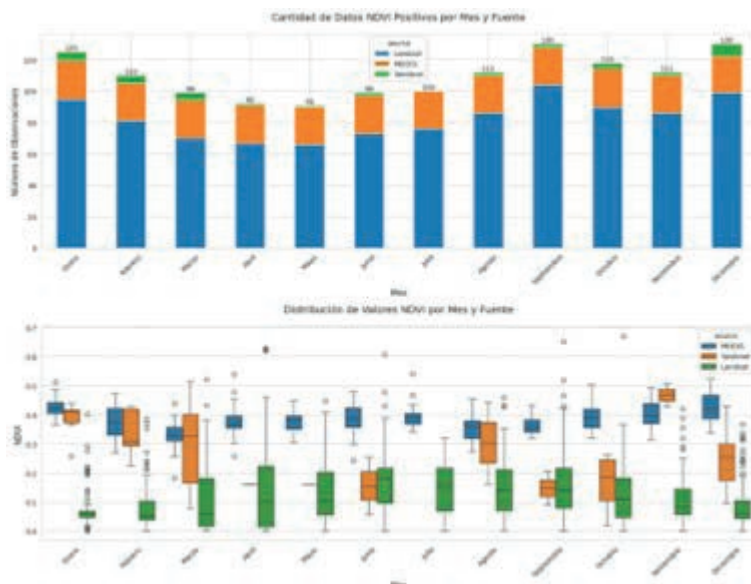


Figura 3

Data set satelital de Landsat, Sentinel y Modis del índice de vegetación normalizado NDVI del territorio de San Blas o Tepic en México.

La tercera fase implicó la recopilación de datos meteorológicos satelitales. Se obtuvieron precipitaciones (1984-2024) de IDAHO Tierra Climate y temperaturas (desde 2002) de MODIS. Diciembre tuvo la menor precipitación, mientras que los picos se registraron en agosto (México), septiembre (Costa de Marfil) y octubre (Colombia). Los cambios de temperatura mostraron mínimos en junio-julio para Colombia y Costa de Marfil, a diferencia de México.

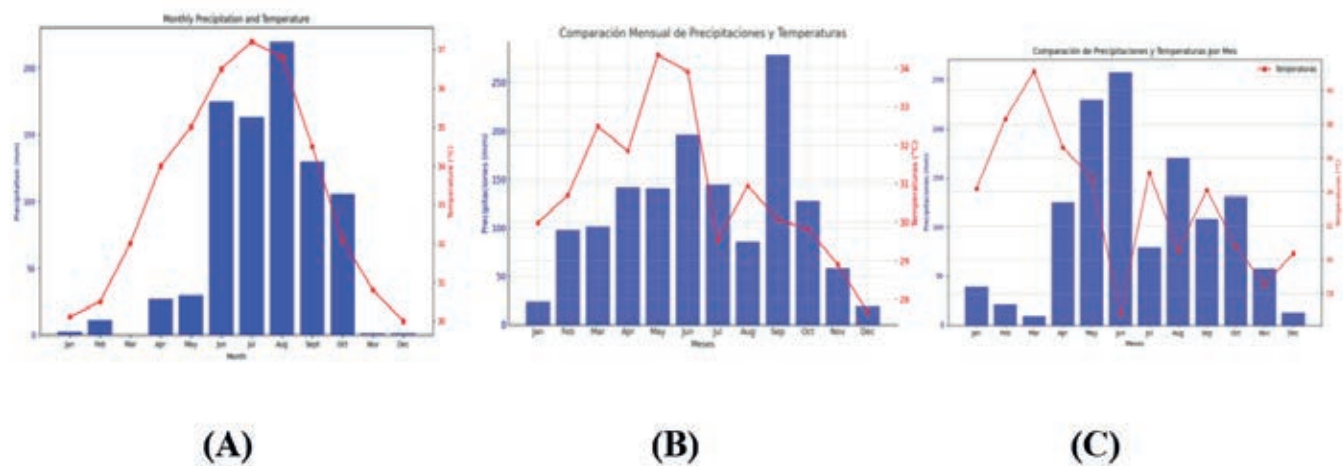


Figura 4

Datos meteorológicos de precipitaciones y temperatura (A) México. (B) Sakassou en Costa de Marfil y (C) Tierra Alta en Colombia.

La fase cuatro implica la recopilación de fotografías de Tierra Alta, Colombia, y Sakossou, Costa de Marfil, tomadas con un Dji mini 2 para crear ortomosaicos (Figura 5).



Figura 5

Fotogrametría (A) Tierra Alta e Ibague; (B) Sakossou en Costa de Marfil.

Se predice que el NDVI en Tierra Alta, Córdoba, y Lérída, Ibagué, Colombia, aumentará de 0.434 en 2026 a 0.542 en 2046, indicando una mejora en la salud de la vegetación y la sostenibilidad agrícola.

En México, las proyecciones del NDVI indican un incremento moderado con valores promedio de 0.352 en 2026, 0.378 en 2036 y 0.404 en 2046, lo que refleja una mejora en la calidad de la vegetación gracias a las buenas prácticas agrícolas y tecnologías avanzadas.

En Sakassou, Costa de Marfil, el NDVI muestra un crecimiento sostenido pero más lento, proyectándose valores de 0.256 en 2026, 0.291 en 2036 y 0.325 en 2046. Esto subraya la necesidad de estrategias agrícolas y tecnológicas para una mayor sostenibilidad de los cultivos.

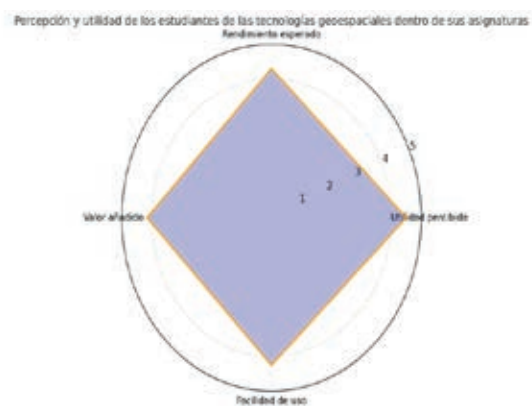
La evaluación a 100 estudiantes universitarios revela una percepción altamente positiva sobre el uso de tecnologías geoespaciales en educación. Los geoportales como LandViewer, Google Earth Engine y OpenAerialMap tuvieron un 97% de aceptación por su utilidad académica. La disposición a capacitarse (95%), la percepción de aprendizaje práctico (94%) y la accesibilidad tecnológica (93%) también fueron altamente valoradas, indicando que los estudiantes reconocen el valor de estas herramientas y están motivados a utilizarlas.

La integración de lenguajes de programación (90%) y el desarrollo de soluciones ambientales reales (89.6%) obtuvieron las puntuaciones más altas. La comprensión ecológica (89%) y la motivación de uso (88%) se mantuvieron sólidas. Los datos de drones (87%) tuvieron menor aceptación, pero siguen siendo favorables. Estos resultados demuestran la utilidad y aplicabilidad de las herramientas geoespaciales en educación ambiental y agrícola.

Los estudiantes de UNIMINUTO Ibagué perciben positivamente el uso de tecnologías geoespaciales en sus asignaturas (utilidad 4.3, rendimiento 4.4, valor añadido 4.3). Aunque la facilidad de uso es ligeramente menor (4.2), la aceptación general y la disposición a integrar estas tecnologías en la educación son altas.



(A)



(B)

Figura 6

Evaluación de Percepción y Utilidad de las tecnologías geoespaciales (A) y (B).

Conclusiones

La incorporación de tecnologías geoespaciales, basadas en datos obtenidos por satélites y drones, dentro de programas de Ingeniería de Datos, Sistemas y Software, ha demostrado ser una estrategia pedagógica eficaz para promover competencias técnicas y analíticas. Los resultados obtenidos a partir de la evaluación a 100 estudiantes de Colombia, México y Costa de Marfil reflejan una percepción positiva, destacando la utilidad académica (97%), el interés por capacitarse (95%) y el aprendizaje práctico (94%). Estos datos confirman que el uso educativo de plataformas como Google Earth Engine, Copernicus y herramientas de programación como Python contribuye significativamente a la apropiación del conocimiento, el desarrollo de soluciones ambientales y la comprensión del estado ecológico de los territorios.

Los estudios de caso realizados en Tierra Alta e Ibagué (Colombia), San Blas (México) y Sakassou (Costa de Marfil) demuestran que la combinación de imágenes satelitales y datos de drones, junto con modelos de regresión y aprendizaje automático, permite proyectar con precisión la evolución del índice de vegetación (NDVI) hasta el año 2046. Este enfoque no solo fortalece la sostenibilidad agrícola y la seguridad alimentaria, sino que también facilita la toma de decisiones fundamentadas en evidencia geoespacial. En consecuencia, se valida la hipótesis sobre el impacto positivo de integrar tecnologías geoespaciales en la educación superior, tanto en términos formativos como de aplicabilidad territorial real.

Referencias

- Clark, E. T. (1997). El destino indivisible de la educación. Editorial Pax México. https://books.google.co.cr/books?id=5TSuwOM4_WQC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false
- Federación Nacional de Arrozeros. (2024). *Mayor consumo de arroz en Colombia, símbolo de seguridad alimentaria y tradición*. Fedearroz. <https://fedearroz.com.co/es/publicaciones/editoriales/2024/08/13/mayor-consumo-de-arroz-en-colombia-simbolo-de-seguridad-alimentaria-y-tradicion/>
- Infobae. (2024, julio 11). *Crisis en la producción de arroz: pérdida de cultivos pone en riesgo la seguridad alimentaria del país*. Recuperado de <https://www.infobae.com/colombia/2024/07/11/crisis-en-la-produccion-de-arroz-perdida-de-cultivos-pone-en-riesgo-la-seguridad-alimentaria-del-pais/>
- El Tiempo. (2021, septiembre 26). *Problemas que tienen en graves líos a los arrozeros del país*. Recuperado de <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/problemas-que-tienen-en-graves-lios-a-los-arroceros-del-pais-613528>
- El País. (s.f.). *Estos son los desafíos de los productores de arroz en el país*. Recuperado de <https://www.elpais.com.co/valle/estos-son-los-desafios-de-los-productores-de-arroz-en-el-pais.html>
- TierraFértil®. (2024, octubre 22). *El cultivo del arroz en México*. Recuperado de <https://tierrafertil.com.mx/2024/10/22/el-cultivo-del-arroz-en-mexico/>
- Agrosavia. (s.f.). *Manejo integrado de plagas del arroz y sus enemigos naturales*. Recuperado de <https://repositorio.agrosavia.co/handle/20.500.12324/38878>
- Avtar, R., Saito, O., Singh, G., & et al. (2014). Monitoring responses of terrestrial ecosystem to climate variations using multi temporal remote sensing data in Ghana. En International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946535>
- G. Messina, J. M. Peña, M. Vizzari, y G. Mónica. (2020) "Comparación de imágenes multispectrales obtenidas por drones y satélites en el seguimiento del cultivo de cebollas. Una aplicación en la 'Cipolla Rossa di Tropea' (Italia)." *Sensores Remotos*, vol. 12, no. 20, p. 3424, 18 de octubre de 2020. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/rs12203424>
- Arteaga-Rojas, L. M., Monje, J., & Aguirre, E. A. (s.f.). Aplicación de la tecnología AMTEC para la gestión de datos del cultivo de arroz en Côte d'Ivoire [Application of AMTEC technology for rice cultivation data management in Côte d'Ivoire]. UNIMINUTO. Disponible: <https://revista.ccaitec.com/index.php/ridt/issue/view/9/9>
- Alzahrani, A., & Alzahrani, A. (2025). Understanding ChatGPT adoption in universities: The impact of faculty TPACK and UTAUT2 [Comprendiendo la adopción de ChatGPT en universidades: El impacto del TPACK y UTAUT2 en los docentes]. *RIED-Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 28(1), 37-58. <https://doi.org/10.5944/ried.28.1.41498>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2017). *Arroz Mexicano: Planeación Agrícola Nacional 2017-2030*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256423/B_sico-Arroz.pdf
- León-Garrido, A., Gutiérrez-Castillo, J. J., Barroso-Osuna, J. M., & Cabero-Almenara, J. (2025). Evaluación del uso y aceptación de apps móviles en educación superior mediante el modelo TAM [Evaluation of the use and acceptance of mobile apps in higher education using the TAM model]. *RIED-Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 28(1), 107-126. <https://doi.org/10.5944/ried.28.1.40988>
- Sangerman-Jarquín, D. M., & Cruz-Reyes, M. Á. (2024). El mercado de arroz en México: ¿qué factores lo determinan? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(8), 1563-1578. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/3566/6942>
- Arteaga, L.-M., -Monje, J., & Aguirre, E.-A. (2024). Publicación Semestral RICT, 2(4), 49-56. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14194088>
- Bisio, I., Garibotto, C., Haleem, H., Lavagetto, F., & Sciarbone, A. (2024). RF/WiFi-based UAV surveillance systems: A systematic literature review. In Internet of Things (Netherlands) (Vol. 26). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101201>
- González, M. (2015). Del Pensamiento Espacial al Conocimiento Geográfico a Través del Aprendizaje Activo con Tecnologías de la Información Geográfica.
- Hafeez, A., Husain, M. A., Singh, S. P., Chauhan, A., Khan, M. T., Kumar, N., Chauhan, A., & Soni, S. K. (2023). Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: A review. In Information Processing in Agriculture (Vol. 10, Issue 2, pp. 192-203). China Agricultural University. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.02.002>
- Ishiwatari, M. (2024). Leveraging Drones for Effective Disaster Management: A Comprehensive Analysis of the 2024 Noto Peninsula Earthquake Case in Japan. In Progress in Disaster Science (Vol. 23). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2024.100348>
- Manolucos, J. A., & Vazquez, M. L. (2014). El uso de la cartografía e imágenes satelitales como recurso didáctico en la enseñanza. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, 5(2), 1-24. <https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v5i2.70>
- Ramachandran, A., & Sangaiah, A. K. (2021). A review on object detection in unmanned aerial vehicle surveillance. *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, 2, 215-228. <https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2021.11.005>
- Sestras, P., Badea, G., Badea, A. C., Salagean, T., Roşca, S., Kader, S., & Remondino, F. (2025). Land surveying with UAV photogrammetry and LiDAR for optimal building planning. *Automation in Construction*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106092>
- Wijayanto, A. K., Prasetyo, L. B., Hudjimartu, S. A., Sigit, G., & Hongo, C. (2024a). Textural features for BLB disease damage assessment in paddy fields using drone data and machine learning: Enhancing disease detection accuracy. *Smart Agricultural Technology*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.jatech.2024.100498>
- Wijayanto, A. K., Prasetyo, L. B., Hudjimartu, S. A., Sigit, G., & Hongo, C. (2024b). Textural features for BLB disease damage assessment in paddy fields using drone data and machine learning: Enhancing disease detection accuracy. *Smart Agricultural Technology*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.jatech.2024.100498>
- Yeung, R. C. Y., Yeung, C. H., Sun, D., & Looi, C. K. (2024). A systematic review of Drone integrated STEM education at secondary schools (2005-2023): Trends, pedagogies, and learning outcomes. *Computers & Education*, 212, 104999. <https://doi.org/10.1016/J.COMPEDU.2024.104999>

Fotografías

<https://www.telematica.com.pe/para-encontrar-el-exito-en-la-industria-geoespacial-comprometase-constantemente/>

Diseño CAD e Instrumentación de un Robot Tipo Balancín con un Enfoque de Innovación Frugal

Erick Axel Padilla-García^{1,*}, Raúl Dalí Cruz-Morales²,
Jaime González-Sierra³ y David Tinoco-Varela²



Acerca de los autores

¹Tecnológico Nacional de México / Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE), Estado de México, México.

²Departamento de Ingeniería, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

³Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Hidalgo, Instituto Politécnico Nacional, Distrito de Educación, Salud, Ciencia, Tecnología e Innovación, San Agustín, Tlaxiaca, Hidalgo, México.

Resumen

Los robots móviles tienen múltiples aplicaciones en tareas de supervisión, mapeo y ajuste en tiempo real, garantizando la estabilidad y eficiencia del sistema. El robot balancín ha ganado popularidad por que tiene la capacidad de mantenerse equilibrado sobre un único punto de apoyo, adaptándose a diversos tipos de caminos y pendientes. Manteniendo una posición estable mientras realiza tareas como el transporte de cargas o la distribución de materiales en una línea de producción, pero estos robots móviles suelen ser costosos. Una solución es la manufactura aditiva, que posibilita un diseño flexible y escalable, reduciendo costos y facilitando la adaptación del robot. Esto se conoce como innovación frugal y prototipado rápido.

Este manuscrito se centra en el diseño e instrumentación de un robot móvil tipo balancín para cargas de hasta 5 kg, utilizando el diseño mecatrónico secuencial y simulando su comportamiento dinámico. Usando parámetros inerciales para asegurar una solución viable. Se valida con modelado CAD (Dibujo Asistido por Computadora), las dimensiones, pesos y parámetros, logrando un diseño económico y accesible.

Palabras clave: *Diseño mecatrónico, innovación frugal, robótica móvil, robot balancín, manufactura aditiva.*

Abstract

Mobile robots have multiple applications in mapping, and adjustment tasks and real-time monitoring, ensuring system stability and efficiency. The balancing robot has gained popularity because it can remain balanced on a single point of support, adapting to various types of paths and slopes. They maintain a stable position while performing tasks such as transporting loads or distributing materials on a production line, but these mobile robots are often expensive. One solution is additive manufacturing, which enables flexible and scalable design, reducing costs and facilitating robot adaptation. This is known as frugal innovation and rapid prototyping.

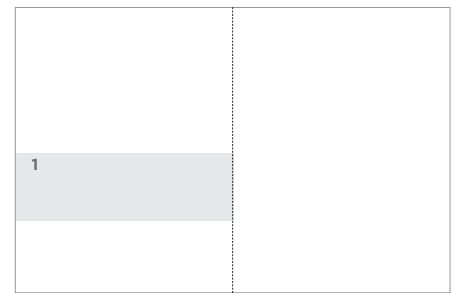
This manuscript focuses on the design and instrumentation of a mobile rocker-type robot for loads of up to 5 kg, using sequential mechatronic design and simulating its dynamic behavior. Inertial parameters are used to ensure a viable solution. The dimensions, weights, and parameters are validated with CAD (Computer-Aided Design) modeling, achieving an economical and accessible design.

Keywords: *Mechatronic design, frugal innovation, mobile robotics, rocker robot, additive manufacturing.*

Introducción

El desarrollo de sistemas mecatrónicos requiere de una estrategia que permita la elaboración combinada de las diferentes áreas de la ingeniería mecánica, electrónica, computación, ingeniería de control y que definen a un artefacto en común (Hernández, 2018). Dichas estrategias han sido un referente metodológico de diseño (Nnodim, 2021), que permiten llevar soluciones factibles de prototipado de grandes proyectos innovadores (Bartalucci, 2023) y complejos como los son los sistemas robóticos (Morales, 2021).

De estas estrategias de diseño mecatrónico se tienen las secuenciales y las iterativas, las cuales han sido muy utilizadas en la comunidad científica para el diseño de nuevos sistemas (Zheng, 2023) y donde es posible considerar todas las etapas del proceso de configuración de un diseño interdisciplinario para lograr un funcionamiento de sistema en específico (Herrera, 2024). Un enfoque de diseño que facilita la creación de productos y sistemas económicos, accesibles, escalables y flexibles, utilizando recursos limitados, es lo que se conoce como diseño frugal (Trejo, 2024). Este enfoque ha dado lugar a un nuevo paradigma en la creación y fabricación de productos, permitiendo el desarrollo de soluciones innovadoras que, al mismo tiempo, son sostenibles, de bajo costo y respetuosas con el medio ambiente (Santiago, 2024).



<https://www.telematica.com.pe/para-encontrar-el-exito-en-la-industria-geoespacial-comprometase-constantemente/>

De este modo, aprovechando la flexibilidad y el acceso a nuevas herramientas de inteligencia artificial, software, Diseño Asistido por Computadora (CAD), el análisis de piezas asistidas por computadora (CAE) y la manufactura asistida por computadora (CAM) es posible satisfacer la necesidad de equilibrar el diseño y la operación de sistemas de funcionamiento complejo, como los robots móviles, al mismo tiempo que se seleccionan y proponen materiales disponibles con recursos más limitados (Lira Hernández, 2022).

El robot balancín, uno de los robots móviles más versátiles, tiene diversas aplicaciones, especialmente en logística y almacenamiento, ya que es capaz de transportar productos y materiales de forma autónoma y rápida dentro de fábricas y centros de distribución (Velandia, 2023). Este robot móvil ha ganado gran popularidad, especialmente en la comunidad científica, donde se buscan soluciones y estrategias de control para lograr un balanceo más adecuado del robot, ya que puede equilibrarse sobre un punto de apoyo y adaptarse a diferentes tipos de caminos y pendientes, manteniendo su equilibrio, ya sea mientras transporta cargas o distribuye materiales en una línea de producción. Sin embargo, los modelos comerciales suelen ser costosos, lo que limita su disponibilidad para proyectos académicos o iniciativas con presupuestos reducidos, donde surge la necesidad de nuevos diseños de robots de este tipo, con un enfoque de innovación frugal, es decir, prototipos escalables, de bajo costo y accesibles acorde a los materiales que se pueden conseguir en el entorno (Trujillo, 2025).

En este artículo se presenta una propuesta metodológica de diseño de sistemas mecatrónicos con un enfoque multidisciplinario, donde es posible usar herramientas de inteligencia artificial para satisfacer alguna o algunas de las etapas disciplinarias del diseño. Posteriormente, se presenta un caso de estudio de aplicación para mostrar el uso de la inteligencia artificial en el proceso del diseño combinado. Para ello, se usan herramientas de libre acceso o de fácil uso, con lo cual es posible lograr propuestas y soluciones de innovación frugal.

La estructura de este artículo es la siguiente: en la Sección 1 se presenta la estrategia metodológica de diseño de sistemas mecatrónicos basada en el modelo matemático que permite definir una configuración específica. En la Sección 2, se expone un caso de estudio de diseño, donde se muestra el diseño CAD obtenido al resolver las ecuaciones del modelo dinámico y, mediante los parámetros del dibujo, se realiza una propuesta de síntesis e instrumentación del sistema. En la Sección 3, se incluyen algunas reflexiones y discusiones sobre las ventajas, desventajas y costos del sistema mecatrónico desarrollado, para concluir, en la Sección 4, con las conclusiones de la propuesta presentada.

1. Metodología de Diseño

Podemos definir el concepto de “diseñar” como el proceso de configuración de un sistema dentro de un campo de estudio (Díaz, 2023). En este proceso de configuración, se identifican y establecen variables de decisión, que permiten hallar una solución particular en un modelo; parámetros de diseño, aquellos valores que no podemos cambiar, pero son necesarios en el proceso de configuración, como el valor de la gravedad, parámetros inerciales de algún material, entre otros. Así, desde un punto de vista más formal, podemos encontrar, mediante modelos matemáticos (Morales, 2021), aquellas variables en combinación que permiten determinar un diseño concreto dentro de un proceso de configuración, que se expresa como:

$$y_D = f(P_D; V_D) \quad (1)$$

donde y_D es la expresión matemática que da síntesis a una configuración física, que necesita de las variables V_D y parámetros P_D para lograr dicha solución, es decir, asignar valores y parámetros a nuestras diferentes partes de síntesis del diseño, que pueden ser, tamaños, la cinemática del mecanismo, o incluso pueden usarse como restricciones para encontrar valores dentro de un rango, en un determinado campo que puede ser el diseño mecánico estructural del robot balancín, el diseño instrumental del sistema como encoders y acelerómetros más asequibles de la región, la selección de actuadores, basados en el peso, tamaños, precios, rangos eléctricos de operación, entre otros. Una forma de obtener estas síntesis de diseño es a través de software de computación como Dibujo Asistido por Computadora (CAD) que nos permite definir dimensiones y parámetros inerciales del sistema, el análisis de materiales por computadora (CAE) y la manufactura asistida por computadora (CAM). En esta propuesta se usó SolidWorks para el análisis estructural, instrumentación, parámetros inerciales, centros de masa, pesos y demás parámetros de síntesis del robot balancín.

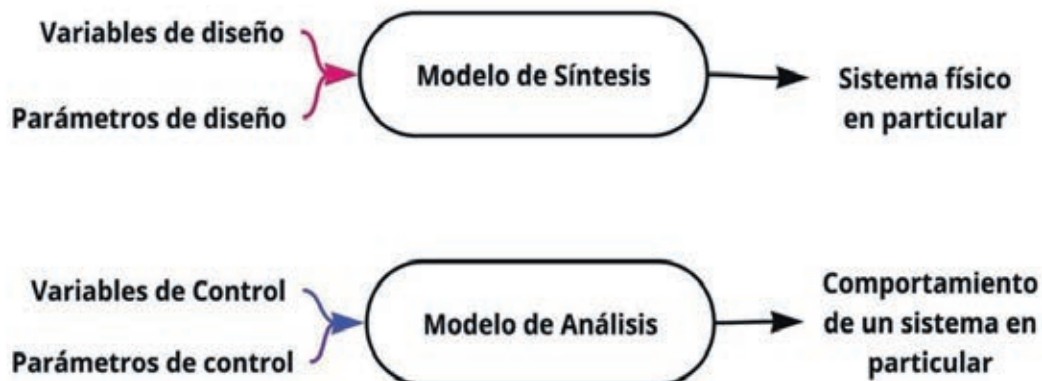
Por otro lado, también podemos definir un modelo que nos permitirá analizar el comportamiento o accionamiento de los sistemas integrados, a través de modelos matemáticos dinámicos o modelos de análisis, que pueden expresarse usando ecuaciones diferenciales del tipo:

$$\dot{x} = f(x)x + g(x)u, \text{ con } y = h(x) \quad (2)$$

En el modelo, x representa aquellas variables de estado del sistema que determinan el comportamiento de este, $f(x)$ es la función del proceso del comportamiento, $g(x)$ la función que depende de las entradas u . Dada una entrada del sistema, se obtiene un comportamiento $h(x)$ que define la respuesta y del sistema en análisis. Más detalles sobre el modelo de sistemas dinámicos pueden encontrarse en (Zill, 2022). En esta propuesta se usó el modelo dinámico de un robot balancín, que por medio de asignación de variables de control y de diseño lograba obtener comportamientos deseados de balance, para posteriormente partir con una solución particular de los mismos.

Figura 1

Diseño de sistemas basado en el modelo. (Diseño propio).



Ambos modelos de síntesis y de análisis (Figura 1) permiten obtener un diseño factible real que pudiera construirse y permiten definir y decidir no solamente una configuración física, sino también medir el desempeño del sistema (Durango, 2018; Pedraza, 2017).

Una metodología muy usada en la comunidad científica para el diseño de sistemas mecatrónicos es a través del uso de estrategia de diseño mecatrónico, que puede ser secuencial o iterativo, con los cuales podemos asegurar un diseño integrado de las propuestas mecánicas, eléctricas, y de control de manera integrada (Cervantes, 2021), como puede verse en la Figura 2.



Figura 2

Diagrama de metodología de diseño. (Diseño propio).

En un modelo mecatrónico secuencial se tiene la combinación de ambos modelos, tanto de síntesis como de análisis (Carvajal, 2025); en uno se especifica el diseño estructural o configuración física del sistema, mientras que en el otro se permite evaluar el desempeño de operación. Siendo un problema de diseño multidisciplinario, de manera tradicional se define primero la estructura o la síntesis del prototipo a desarrollar (considerando elementos con un enfoque frugal) y posteriormente se evaluará el comportamiento del sistema combinado (Ábrego Preza, 2021)

1.2 Caso de estudio: Diseño de robot balancín

La propuesta usa metodología tradicional de diseño mecatrónico para lograr el diseño del robot; sin embargo, para validar si el diseño es el adecuado, se hace a través del modelado del sistema en lazo cerrado. Así, es posible buscar los parámetros adecuados a través de la reconfiguración del modelado, mostrado en la Figura 3.

El equilibrio del robot se logra mediante un algoritmo de control: para ello se propone utilizar el controlador más usado en la industria, el controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) siendo el más utilizado por su capacidad de respuesta en tiempo real (Borase, 2021).

El controlador PID es un sistema de control realimentado cuyo objetivo es eliminar el error entre la señal de referencia y la señal de salida a medida

que el tiempo tiende a infinito. Además, anticipa el comportamiento futuro mediante la acción derivativa, que predice la salida del proceso (Joseph, 2022).

En esta sección se presenta el modelado matemático del sistema. En la Figura 3, se muestra la vista lateral y el sistema de coordenadas sobre el cual se elabora el modelo matemático para el péndulo invertido sobre dos ruedas, cuyos parámetros del sistema se muestran en la Tabla 1. Entonces, considerando el sistema de fuerzas y los momentos de inercia para obtener el modelo en espacio de estados, las ecuaciones de movimiento pueden escribirse como sigue.

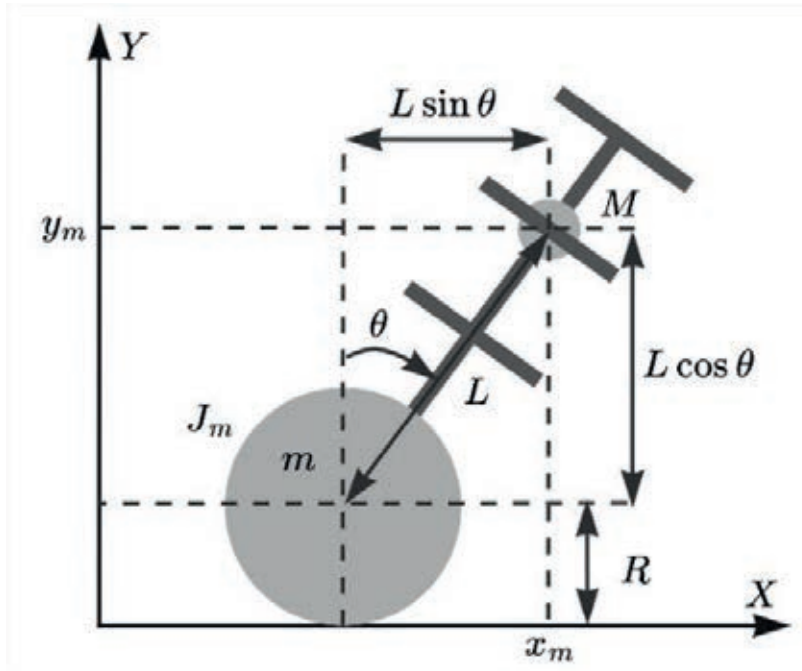


Figura 3

Esquema de referencia del robot balancín. (Diseño propio).

1. Primera ecuación (movimiento del carro):

$$(m_c + m_p)\ddot{x} + m_p L \ddot{\theta} \cos \theta - m_p L \dot{\theta}^2 \sin \theta = u \quad (3)$$

2. Segunda ecuación (rotación el péndulo):

$$m_p L \ddot{x} \cos \theta + m_p L^2 \ddot{\theta} = m_p g L \sin \theta \quad (4)$$

3. Ecuaciones de movimiento que el brazo forma respecto a la posición vertical

$$\tau = I \ddot{\theta} + m g L \sin \theta \quad (5)$$

TABLA 1.
PARÁMETROS DEL ROBOT BALANCÍN

Parámetro	Descripción	Unidad
g	Aceleración de la gravedad	m/s^2
m	Masa de la rueda	kg
R	Radio de las ruedas	m
I_m	Momento de inercia de las ruedas	kgm^2
M	Masa del cuerpo del péndulo	kg

Derivado de las ecuaciones y parámetros, para modelar el sistema y poder simular el comportamiento de éste, se tienen las siguientes consideraciones:

- $m_p = 5$ kg, siendo la masa deseada en la carga.
- L es la longitud del péndulo desde el pivote hasta el centro de masa.
- $g = 9.81$ m/s², siendo la aceleración debida a la gravedad.
- θ ffi 0 corresponde al equilibrio vertical.
- Para pequeñas oscilaciones alrededor del equilibrio (θ ffi 0), se puede aproximar $\sin(\theta)$ ffi θ .
- El modelo linealizado alrededor del punto de equilibrio muestra el comportamiento del sistema.

Ahora, si deseamos describir el sistema en términos de estado espacial, definimos las variables de estado, $x_1 = \theta$, $x_2 = \dot{\theta}$, entonces el modelo queda como sigue:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (6)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{\tau}{mL^2} - \frac{g}{L} x_1 \quad (7)$$

Considerando el enfoque frugal del diseño a partir del entorno donde se está realizando el prototipo

- **Actuador:** Seleccionar un motor DC o un servomotor económico capaz de generar el torque necesario.
- **Sensor:** Usar un encoder asequible para medir θ cercano al punto de equilibrio.
- **Controlador:** Un PID puede ser suficiente para estabilizar el sistema si la linealización es válida en la ecuación (6) y la ecuación (7).

1.1 Simulación

El código simula el comportamiento de un robot balancín con una carga de 5 kg, utilizando un modelo linealizado en el espacio de estados. A través de este código, y al asignar las dimensiones adecuadas en el diseño CAD del robot balancín propuesto, es posible definir los parámetros físicos del sistema, como la masa, la gravedad, la fricción y la inercia, junto con el modelo matemático correspondiente. Sin embargo, para ejecutar la simulación, es necesario establecer las entradas de control. Para ello, se emplea un controlador PID, que ajusta el torque en función del error angular para mantener el equilibrio del robot y se agrega el factor de fricción viscosa b . El código completo del programa se presenta en la Figura 4. Mediante el uso de CAD y el análisis del modelo dinámico, el estado del sistema se actualiza de manera iterativa, registrando los siguientes valores para los parámetros del sistema:

$$m_p = 5, m_c = 1, L = 0.5, I = 0.006 \text{ y } b = 0.1.$$

Además, se asignaron las siguientes ganancias para el controlador PID: $K_p = 100$, $K_d = 1$ y $K_i = 20$. Con estos valores, el robot balancín logra mantenerse en posición vertical, con la carga requerida.

```

1 % Parámetros físicos del sistema
2 M = 1; % Masa del robot (kg)
3 m = 5; % Masa de la carga (kg)
4 l = 0.5; % Longitud del centro de masa al eje de las ruedas (m)
5 g = 9.81; % Gravedad (m/s^2)
6 I = 0.006; % Inercia del cuerpo del robot (kg*m^2)
7 b = 0.1; % Coeficiente de fricción en las ruedas
8
9 % Estado inicial del sistema
10 x = [0; 0; pi; 0]; % Estado [posición; velocidad; ángulo; velocidad angular]
11
12 % Matrices del modelo linealizado (modelo de espacio de estados)
13 A = [0 1 0 0;
14      0 -b*(I+m*l^2)/(I*(M+m)+M*m*l^2) (m*l*g*I^2)/(I*(M+m)+M*m*l^2) 0;
15      0 0 1;
16      0 -b*m*I/(I*(M+m)+M*m*l^2) m*g*I*(M+m)/(I*(M+m)+M*m*l^2) 0];
17
18 B = [0;
19      (I+m*l^2)/(I*(M+m)+M*m*l^2);
20      0;
21      m*I/(I*(M+m)+M*m*l^2)];
22
23 C = [1 0 0 0;
24      0 0 1 0];
25
26 D = [0;
27      0];
28
29 % Controlador PID (gains)
30 Kp = 100; % Ganancia proporcional
31 Ki = 1; % Ganancia integral
32 Kd = 20; % Ganancia derivativa
33
34 % Simulación de control PID para el robot balancín
35 dt = 0.01; % Intervalo de tiempo
36 t_total = 10; % Tiempo de simulación en segundos
37 t = 0; % Tiempo actual
38
39 % Estado del sistema
40 x_hist = zeros(4, length(t));
41 u_hist = zeros(1, length(t));
42
43 % Simulación
44 for i = 1:length(t)
45     % Error de ángulo (debería ser cero si está balanceado)
46     theta_error = pi - x(i);
47
48     % Control PID
49     u = Kp * theta_error - Kd * x(i); % Control derivativo basado en la vel
50
51     % Simulación del modelo de espacio de estados
52     dx = A*x + B*u;
53
54     % Actualizar el estado del sistema
55     x = x + dx * dt;
56
57     % Almacenar los resultados
58     x_hist(:, i) = x;
59     u_hist(i) = u;
60 end
61

```

Figura 4

Programa en Octave del robot balancín. (Diseño propio).

2. Resultados

Después de un proceso heurístico de selección de componentes, materiales y simulación, se obtiene el resultado CAD mostrado en la Figura 5, donde se propone lo siguiente:

- **Estructura y soporte:** Base y chasis de placa de madera contrachapada, impresión 3D PLA, acrílico, o metal ligero, los cuales permiten el buen equilibrio del robot, con dimensiones de 200x100 [mm]. Se propone tornillería M3/M4 para ensamble de uniones y separadores en impresión 3D entre las bases del robot.
- **Componentes mecánicos:** Ruedas de goma y diámetro de 60-80 [mm]. Rueda tipo castor para balancear el robot, y cables e interruptores en general.
- **Actuadores:** Motores de DC con reductores de plástico, con voltaje de operación de 6 a 12 [V]. Se propone usar un driver L298N y un microcontrolador Arduino UNO o NANO.
- **Sensores:** Se usaría un acelerómetro/giroscopio MPU6050 para medir la referencia real.
- **Energía:** Baterías recargables 18650 con un convertidor DC-DC para un banco de 5 [V].
- **Diseño en SolidWorks:** Primero se fue creando la base principal donde se van ajustados los motores, como los componentes que serían la batería y los drivers.

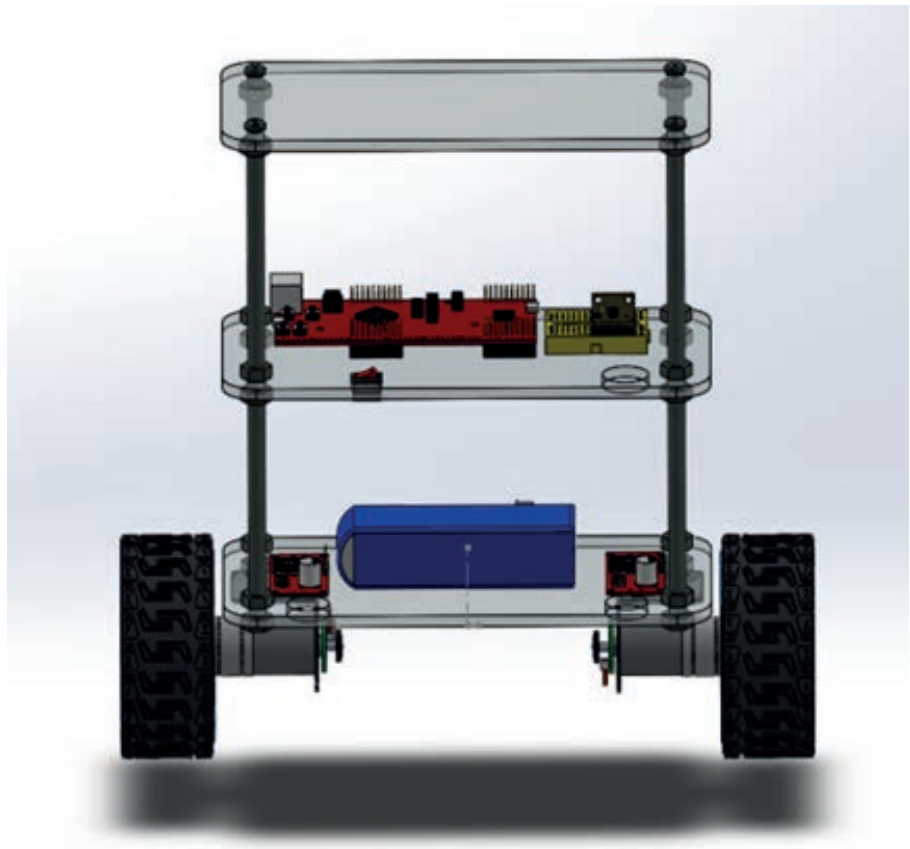


Figura 5

Diseño propuesto del robot balancín. (Diseño propio).

La segunda base se creó para poder implementar los componentes como el microcontrolador, botón de accionamiento del robot y el acelerómetro MPU6050, así como se logra ver en la Figura 6.

Por último, se creó la base final, la que soportara el cargamento que llevara el robot, con una capacidad de 5 Kg sin perder el equilibrio automático del robot en la posición vertical.

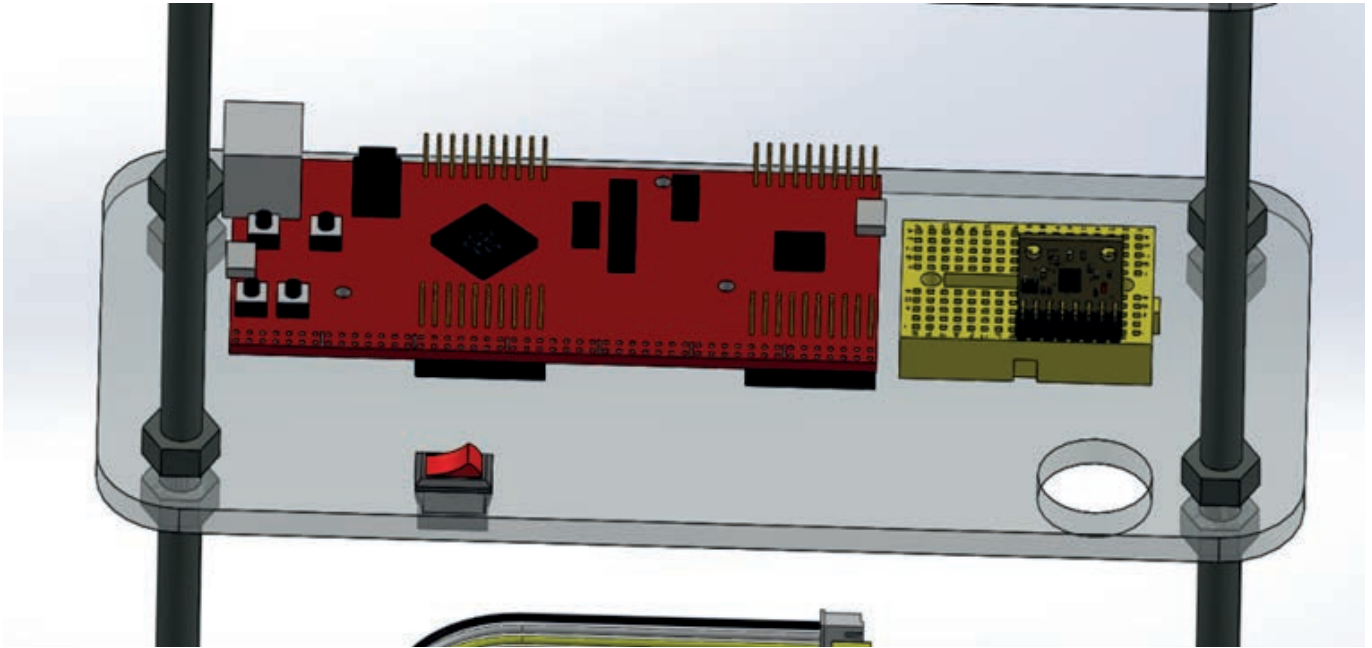


Figura 6

Segunda base del robot balancín.
(Diseño propio).

3. Discusiones

El diseño del robot balancín con una carga de 5 kg cumple parcialmente con los objetivos establecidos. En cuanto a su capacidad de carga, las pruebas realizadas demuestran que puede soportar los 5 kg sin comprometer su estabilidad, manteniendo el equilibrio incluso frente a perturbaciones moderadas. Esto se debe a una adecuada distribución del centro de masa y a un diseño estructural eficiente, utilizando materiales ligeros y resistentes, lo que también contribuye a mantener un costo reducido, aproximado en \$2500 pesos mexicanos. Este precio puede variar dependiendo de la ubicación, los precios locales, la disponibilidad de entrega y otros factores logísticos. En el caso específico de la zona norte del Estado de México, este costo es bastante accesible en comparación con otros kits de robots disponibles en tiendas locales y en línea, aunque puede depender del tiempo y la ubicación de entrega.

El sistema de control, basado en un algoritmo PID, presenta un desempeño satisfactorio en entornos controlados, pero muestra limitaciones en situaciones dinámicas, como inclinaciones del terreno o perturbaciones fuertes. Los sensores utilizados, principalmente giroscopios y acelerómetros

de bajo costo, ofrecen un rendimiento adecuado, aunque su precisión podría mejorarse para aumentar la confiabilidad en el balanceo. Por otro lado, los motores y actuadores cumplen con los requisitos de potencia, pero su alto consumo energético afecta la autonomía del robot. Desde una perspectiva económica, el diseño logra un costo significativamente inferior al de soluciones comerciales, gracias al uso de componentes accesibles y a un proceso de fabricación simplificado. No obstante, esto implica una cierta compensación en cuanto a la durabilidad de algunos elementos, lo que podría limitar la vida útil del robot.

Conclusiones

Se propuso una solución frugal en el diseño de un robot balancín, utilizando una metodología de diseño mecatrónico a través de CAD y parametrizando el robot mediante un modelo matemático. Este enfoque permitió desarrollar una solución viable, económica y funcional. El robot balancín, diseñado para soportar una carga de 5 kg, demuestra la factibilidad de crear sistemas robóticos accesibles y eficientes para aplicaciones específicas.

Al optimizar recursos y utilizar componentes estándar del mercado, se alcanzó un equilibrio adecuado entre costo, funcionalidad y desempeño. Para lograr los parámetros adecuados en el diseño CAD, se emplearon configuraciones específicas en el modelado del robot, lo que permitió reducir significativamente los costos sin comprometer los objetivos.

Este proyecto abre la puerta a futuras mejoras, como la integración de sistemas de inteligencia artificial para la toma de decisiones autónoma, el desarrollo de capacidades adicionales como la manipulación de objetos y la adaptación a superficies diversas. Además, el enfoque económico hace que este robot sea una solución viable para pequeñas y medianas empresas, instituciones educativas o laboratorios de investigación.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Instituto Politécnico Nacional a través del Proyecto SIP: 20253806, y de la Universidad Nacional Autónoma de México, mediante los proyectos PAPIME PE104125 y CI 2446.

Referencias

- Ábrego Preza, E. S. (2021). Propuesta de diseño de un sistema didáctico de llenado automático, enfocado en el control de calidad, utilizando tecnología y dispositivos IoT: aplicación académica en Escuela de Ingeniería Mecatrónica.
- Bartalucci, L. S. (2023). An original mechatronic design of a kinaesthetic hand exoskeleton for virtual reality-based applications. *Mechatronics*, 90, 102947.
- Borase, R. P. (2021). A review of PID control, tuning methods and applications. *International Journal of Dynamics and Control*, 9, 818-827.
- Carvajal, R. J. (2025). *Methodology and electromechanical design of robots*.
- Cervantes, C. H. (2021). Concurrent Design of a 2 Dof Five-Bar Parallel Robot a Hybrid Design of Rigid and Flexible Links. *IEEE Access*, 9, 17450-17462.
- Díaz, D. J. (2023). *Diseño, implementación, simulación y control de un brazo robótico para el Rover UVG*.
- Durango, I. S. (2018). Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura. *Memorias IV Congreso AMDM 2018*.
- Hernández, G. C. (2018). *Enfoques, teorías y perspectivas de la Ingeniería de Sistema y sus programas académicos*. Corporación Universitaria del Caribe.
- Herrera, C. C. (2024). Desarrollo de competencias a través de prototipos y simuladores en un entorno interdisciplinario de física-matemática. *Revista Oratores*, 20, 78-102.
- Joseph, S. B. (2022). Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: Review, approaches and open problems. *Heliyon*, 8(5).
- Lira Hernández, I. A. (2022). <https://doi.org/10.24275/uama.5810.8747>. Obtenido de Sistema híbrido para asistir los procesos de diseño de ingeniería hacia la industria 4.0.
- Morales, C. C. (2021). An Innovative Optimization Design Procedure for Mechatronic Systems with a Multi-Criteria Formulation. *Applied Sciences*, 11(19), 8900.
- Nnodim, T. C. (2021). Future trends in mechatronics. *IAES International Journal of Robotics and Automation*, 1(10), 24.
- Pedraza, Á. J. (2017). *Implementación de una metodología de diseño mecatrónico con herramientas modernas de simulación*.
- Santiago, L. M. (2024). Creando más con menos, la innovación frugal como nuevo paradigma de diseño para la sostenibilidad: Creating more with less, frugal innovation as a new design paradigm for sustainability. *Revista de Estudios Interdisciplinarios del Arte, Diseño y la Cultura, (Especial: Intersecciones entre Sustentabilidad, Artes y Diseño)*, 38-55.
- Trejo, I. O. (2024). Control industrial de un motor a pasos usando tecnología frugal. *AvaCient*, 4(2), 11-21.
- Trujillo, M. S. (2025). El fenómeno de la innovación frugal: productos asequibles, funcionales y minimalistas para atender el segmento bajo del mercado. *Innovar*, 35(95), e101621-e101621.
- Velandia, L. J. (2023). *Sistema de control self-balancing robot (SBR)*.
- Zheng, C. A. (2023). Knowledge-based engineering approach for defining robotic manufacturing system architectures. *International Journal of Production Research*, 61(5), 1436-1454.
- Zill, D. G. (2022). *Ecuaciones diferenciales con aplicaciones de modelado*. Thomson Learnig.

Fotografías

<https://www.telematica.com.pe/para-encontrar-el-exito-en-la-industria-geoespacial-comprometase-constantemente/>

Implementación y Evaluación de Soluciones Bancarias Locales en WebLogic: Consulta de Saldos y Listener para Eventos SPEI

Alan Evani Ramírez Hernández*



Acerca del autor

*Académico de la División de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Tecnológico Nacional de México/ Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Ecatepec de Morelos, Estado de México.

Resumen

Este artículo describe el desarrollo de una pantalla para el cálculo automático del CURP en el sistema bancario Karpay, con acceso exclusivo para usuarios con correos institucionales de Praxis. Se empleó una arquitectura de tres capas y la metodología ágil Scrum, permitiendo un

desarrollo iterativo y adaptable. Los resultados evidencian un rendimiento estable con tiempos de respuesta menores a 500 ms, junto con una integración exitosa con sistemas existentes. La automatización redujo errores manuales y mejoró la eficiencia operativa. Asimismo, se implementaron medidas de seguridad para proteger datos sensibles, incluyendo controles de acceso y cifrado. Finalmente, se identificaron oportunidades para futuras mejoras, como la integración con otros sistemas y la adaptación a distintas normativas financieras, destacando la importancia de este avance en la digitalización y seguridad del sector bancario.

Palabras clave: Automatización, CURP, Seguridad, Datos, Integración, Rendimiento, Protección, Usuario.

Abstract

This article describes the development of a screen for the automatic calculation of the CURP (Currency Reduction Program) in the Karpay banking system, with exclusive access for users with Praxis institutional email addresses. A three-tier architecture and the agile Scrum methodology were used, enabling iterative and adaptable development. The results demonstrate stable performance with response times under 500 ms, along with successful integration with existing systems. Automation reduced manual errors and improved operational efficiency. Security measures were also implemented to protect sensitive data, including access controls and encryption. Finally, opportunities for future improvements were identified, such as integration with other systems and adaptation to different financial regulations, highlighting the importance of this advancement in the digitalization and security of the banking sector.

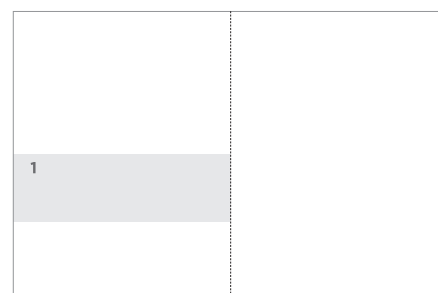
Keywords: Automation, CURP, Security, Data, Integration, Performance, Protection, User.

Introducción

En los últimos años, el sector financiero ha atravesado una transformación acelerada, impulsada por la creciente necesidad de ofrecer servicios más ágiles, seguros y accesibles. Esta evolución responde a una tendencia global de automatización e innovación digital, donde los bancos deben adaptarse rápidamente a nuevas tecnologías para mantener su competitividad (TICNUS Technology Magazine, 2024). En este nuevo panorama, procesos como la consulta de saldos y la gestión de transacciones en tiempo real se han vuelto imprescindibles para garantizar una experiencia óptima al cliente y mantener la operatividad del sistema. No obstante, muchas de las soluciones existentes presentan limitaciones en aspectos como la flexibilidad, escalabilidad y adaptación a entornos específicos, lo que plantea importantes desafíos para las instituciones bancarias.

Este proyecto nace como respuesta a esa demanda, proponiendo una solución tecnológica que integra una pantalla para la consulta de saldos y un listener diseñado para monitorear y procesar eventos transaccionales en tiempo real. La propuesta busca ofrecer una herramienta que no solo cumpla con los estándares del sector en términos de seguridad y disponibilidad, sino que también sea eficiente y adaptable.

Para su implementación, se eligió una arquitectura robusta que utiliza Oracle WebLogic como servidor de aplicaciones y SQL Server como motor de base de datos, ambos ampliamente reconocidos en entornos de alta exigencia.



<https://www.esic.edu/rethink/marketing-y-comunicacion/que-es-la-automatizacion-inteligente-y-que-beneficios-tiene-c>

Esta elección tecnológica se alinea con buenas prácticas en automatización, resiliencia y rendimiento del software financiero, especialmente en contextos donde la disponibilidad continua y la integridad de los datos son críticas (Murillo & Salazar, 2023; Entel Digital, 2024). A lo largo del artículo se detallan las decisiones técnicas adoptadas durante el desarrollo, los principales retos enfrentados y los resultados obtenidos tras someter el sistema a rigurosas pruebas de rendimiento y seguridad. El objetivo es demostrar que es posible construir soluciones efectivas y confiables que satisfagan las necesidades reales del entorno bancario contemporáneo.

1. Materiales y método

El desarrollo de sistemas críticos en el sector bancario requiere no solo precisión técnica, sino también una metodología que permita adaptarse a cambios y entregar resultados de forma ágil y confiable. Desde el inicio, se optó por una arquitectura de tres capas basada en servicios, en la que la lógica de negocio, la interfaz de usuario y el acceso a datos se gestionan de forma modular con la finalidad de facilitar tanto la escalabilidad del sistema como la separación de responsabilidades. Este tipo de arquitectura es altamente recomendada para entornos con grandes volúmenes de datos y alta demanda de disponibilidad, como lo destaca Herrera Mena & Rodríguez Gutiérrez (2024) en su estudio sobre arquitecturas eficientes para la gestión de datos en tiempo real.

Para este proyecto, se adoptó el marco de trabajo Scrum, lo que permitió dividir el proceso en fases iterativas (sprints), facilitando el avance progresivo y la validación continua de cada componente.

1.1 Fase 1: Planificación y Capacitación (Sprint 0).

En esta primera etapa se definieron los requerimientos iniciales y se organizó el Product Backlog, priorizando tareas como el diseño de la interfaz de usuario, la integración con SQL Server y la configuración del listener para el monitoreo de eventos financieros. Durante esta fase también se definieron las tecnologías clave: Oracle WebLogic como servidor de aplicaciones, SQL Server como gestor de base de datos, y Java EE como lenguaje principal para el backend. Además, el equipo recibió capacitación técnica sobre el Sistema de Pagos Electrónicos Interbancarios (SPEI) y las normativas del Banco de México, lo cual fue fundamental para alinear los criterios técnicos y regulatorios antes de comenzar el desarrollo. En este sentido, el cumplimiento de normativas de ciberseguridad y protección de datos resulta esencial, como lo subrayan tanto Banco de México (2025) como Condusef (2025) en sus lineamientos sobre seguridad de la información.

1.2 Fase 2: Desarrollo Inicial (Sprints 1 al 3).

Durante estos primeros sprints se trabajó en la implementación de los aplicativos Karpay y ESICE, utilizando simulacros de transacciones para validar su funcionamiento en condiciones controladas. Se hicieron pruebas de volumen y recuperación ante fallos, y los resultados se analizaron para detectar incidencias y ajustar el sistema. Para apoyar el seguimiento de los cambios y facilitar el mantenimiento a futuro, se mantuvieron registros técnicos detallados, incluyendo configuraciones del servidor WebLogic, esquemas de base de datos, y bitácoras de eventos capturados por el listener mediante Logs de la capa de negocio y comunicación.

Al mismo tiempo se inició el desarrollo de la pantalla y del listener, asegurando su integración con los sistemas existentes. Las reuniones diarias (Daily Scrum) permitieron identificar obstáculos a tiempo y tomar decisiones técnicas sobre aspectos como la optimización de consultas SQL o la configuración del servidor. Al final de cada sprint, se revisaban los avances con base en los datos obtenidos durante las pruebas.

1.3 Fase 3: Desarrollo Continuo y Evaluación (Sprints 4 al 6).

A medida que el sistema fue ganando robustez, se realizaron pruebas bajo condiciones que simulaban escenarios reales de carga y concurrencia. Se integraron herramientas de pruebas automatizadas, como TestLink, y se empleó un robot de pruebas automáticas desarrollado por Praxis que facilitaron la validación de funcionalidades críticas y ayudaron a mantener la estabilidad del sistema. Estas pruebas automatizadas permitieron ejecutar de forma repetida y rápida un gran conjunto de casos, garantizando que las funcionalidades como el cálculo del CURP y el listener operaran correctamente tras cada actualización.

Este robot también redujo significativamente el tiempo dedicado a pruebas manuales, mejoró la cobertura de evaluación y permitió detectar fallos o regresiones desde etapas tempranas del desarrollo. Esto fue esencial para asegurar la integridad del sistema en un entorno bancario con alta demanda y concurrencia.

La infraestructura utilizada incluyó estaciones de trabajo con las siguientes especificaciones:

- 16 GB de RAM como mínimo.
- Procesadores AMD Ryzen 7.
- Conexión directa a servidores de pruebas configurados con WebLogic 12c y SQL Server 2019.
- Al menos 400GB de memoria SSD.

Los datos recopilados en cada iteración, como tiempos de respuesta y comportamiento ante una carga mayor de transacciones, fueron clave para detectar áreas de mejora y tomar decisiones sobre ajustes al diseño y a la lógica del sistema. Además, se aplicaron retrospectivas para evaluar el trabajo del equipo y perfeccionar la comunicación y los procesos de desarrollo. Estas acciones están alineadas con lo señalado por PwC México (2024) respecto a la importancia de la retroalimentación continua en procesos financieros automatizados.

1.4 Fase 4: Integración y Cierre del Proyecto (Sprints 7 y 8).

En la última fase, todos los módulos del sistema fueron integrados y se realizaron pruebas completas en un entorno lo más cercano posible al productivo. Se generó la documentación técnica y funcional necesaria para facilitar su operación y mantenimiento. Finalmente, se capacitó al personal encargado del soporte y a los usuarios finales, asegurando una transición fluida al entorno de producción. También se elaboró un informe técnico que resume los resultados obtenidos, las mejoras aplicadas a lo largo del proceso y las recomendaciones para su futura evolución.

2. Resultados

La implementación de la pantalla para el cálculo del CURP, diseñada con acceso restringido a los correos institucionales de Praxis, ha demostrado un funcionamiento estable y eficiente tras ser sometida a diversas pruebas de rendimiento. A lo largo del desarrollo, se identificaron y aplicaron mejoras que optimizaron su desempeño en el entorno bancario.

2.1 Rendimiento y funcionalidad

Las pruebas realizadas mostraron que la pantalla responde de manera rápida y consistente, con un tiempo promedio de respuesta inferior a 500 milisegundos, desde el ingreso de datos hasta la generación del CURP. Según Herrera Mena y Rodríguez Gutiérrez (2024), la eficiencia en los tiempos de respuesta es un factor crítico en sistemas de alta concurrencia, especialmente en servicios financieros que demandan rapidez y estabilidad. Además, el sistema de validación de correos electrónicos institucionales operó con precisión, asegurando que únicamente los usuarios autorizados tuvieran acceso a esta función.

Con el objetivo de anticipar el comportamiento del sistema bajo condiciones más exigentes, se simuló cargas mayores de tráfico transaccional. En estos escenarios, el rendimiento presentó variaciones graduales, aunque dentro de rangos considerados aceptables, lo que sugiere una buena capacidad de adaptación ante picos de demanda.

2.2 Integración con sistemas existentes

La integración de la pantalla en el entorno de Karpay se logró a través de despliegues controlados y pruebas unitarias. Durante las pruebas de integración, el sistema procesó correctamente el 98% de las solicitudes dirigidas a otros módulos. Los pocos errores identificados se debieron principalmente a incompatibilidades en el formato de los datos, los cuales fueron resueltos de manera oportuna, permitiendo así alcanzar una integración estable.

2.3 Impacto en la eficiencia operativa

La automatización del cálculo del CURP ha supuesto una mejora significativa en la eficiencia operativa. Al eliminar la necesidad de realizar este procedimiento manualmente, se ha reducido el tiempo de procesamiento y se ha minimizado el riesgo de errores humanos, lo que ha mejorado la precisión y confiabilidad en el manejo de los datos. Como afirma PwC México (2024), la automatización de procesos en la banca no solo reduce tiempos sino que también incrementa la calidad del servicio y la satisfacción del cliente.

Si bien no se implementó una medición formal de satisfacción del usuario, durante las sesiones de prueba y capacitación se recibieron comentarios positivos sobre la claridad de la interfaz y la velocidad de respuesta, lo que sugiere una buena recepción inicial del sistema por parte de quienes lo utilizan en su entorno diario.

La Figura 1 ilustra cómo el sistema mantiene tiempos de respuesta estables en condiciones normales y cómo estos se incrementan de manera controlada ante escenarios de alta carga, sin comprometer la operatividad general.

Estos resultados reflejan un desempeño sólido por parte del sistema, capaz de responder adecuadamente a las exigencias de un entorno bancario caracterizado por altos niveles de criticidad y concurrencia.

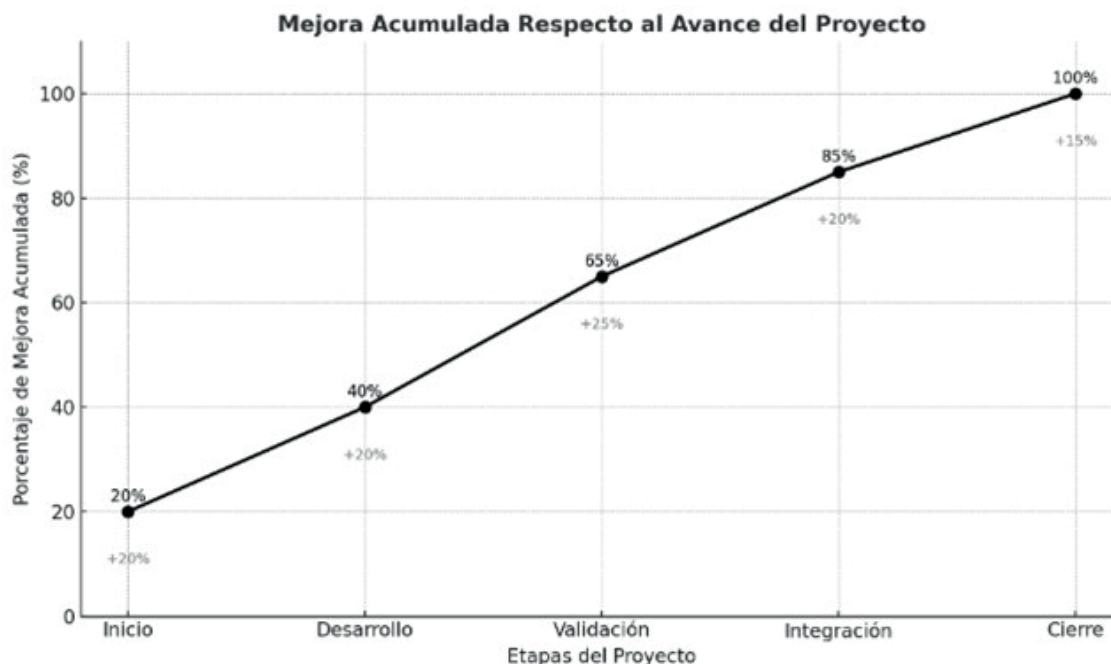


Figura 1

Mejora acumulada respecto al avance del proyecto.

2.4 Pruebas automatizadas y aseguramiento de calidad

La implementación de pruebas automatizadas fue clave para mantener la calidad del sistema durante su evolución. Gracias al uso de herramientas como TestLink, se lograron validar de manera continua las funcionalidades principales, asegurando que cada modificación o mejora no afectará el rendimiento ni la estabilidad del sistema. Esto contribuyó a minimizar errores y a reducir el tiempo necesario para las pruebas, lo que agiliza la entrega de versiones más confiables.

2.5 Seguridad de los datos y protección de la privacidad.

El sistema gestiona información personal sensible, como datos de identificación del usuario, por lo que es importante tomar medidas específicas para garantizar su seguridad y resguardo. La validación por medio de correos institucionales no solo sirvió como filtro de acceso, sino que también funcionó como un primer nivel de seguridad, restringiendo el uso de la funcionalidad exclusivamente a personal autorizado. Este tipo de control de acceso es recomendado por Banco de México (2025) en sus lineamientos para la seguridad en sistemas financieros.

Según la Condusef (2025), es imprescindible tomar medidas para mantener la confidencialidad e integridad de los datos en el sector bancario, por lo que durante el desarrollo se integraron mecanismos de cifrado para la transmisión

de datos sensibles, asegurando que la información no pudiera ser interceptada ni alterada en tránsito. Además, se aplicaron controles de acceso basados en roles, de modo que solo ciertos perfiles tuvieran autorización para ejecutar tareas críticas dentro del sistema.

Por último, la arquitectura del sistema fue diseñada contemplando las políticas de retención de datos que limitan el tiempo de almacenamiento de la información personal del usuario, por lo que es necesario realizar cambio de credenciales cada cierto periodo. De este modo no solo se cumplen las normativas establecidas, sino que también se fortalece la confianza del usuario frente a un entorno de sensibilidad alta como lo es el sector bancario.

3. Discusión

La funcionalidad desarrollada para el cálculo del CURP, pensada exclusivamente para usuarios con correos institucionales de Praxis, ha resultado ser una solución efectiva dentro del entorno de Karpay. Más allá de su correcto desempeño técnico, representa un avance importante hacia una mayor automatización y control en los sistemas bancarios, donde la precisión de los datos y la rapidez en los procesos son cada vez más relevantes.

Uno de los aspectos más destacados fue su rápido tiempo de respuesta, que demuestra su capacidad para operar en momentos de alta demanda. Este rendimiento no solo responde a una necesidad técnica, sino que tiene un impacto directo en la experiencia del usuario, que espera interacciones ágiles y confiables. Además, al requerir correos institucionales para acceder a la pantalla, se añadió una capa de seguridad que refuerza la confianza en el sistema, tal como sugieren las recomendaciones de seguridad para sistemas financieros de Banco de México (2025).

Durante la integración con los demás módulos de Karpay, se obtuvo un desempeño bastante estable. Sin embargo, se identificaron algunos errores menores relacionados con el formato de datos. Estos detalles, aunque resueltos, ponen sobre la mesa la importancia de realizar pruebas de compatibilidad desde las primeras etapas del desarrollo.

La automatización de esta tarea trajo varios beneficios: se redujeron los tiempos de ejecución y se eliminaron errores que solían surgir cuando el proceso era manual. Esto no solo optimiza recursos, sino que también deja abierta la posibilidad de automatizar otros procesos similares.

A partir de estos resultados, se abre también un campo de oportunidades para investigaciones futuras. Por ejemplo, podría explorarse la posibilidad de integrar la pantalla de cálculo del CURP con otros sistemas internos o externos al ecosistema bancario, así como evaluar su adaptación para instituciones financieras con normativas y estructuras diferentes. Este tipo de exploraciones permitiría no solo expandir el alcance del sistema, sino también probar su versatilidad frente a nuevos desafíos tecnológicos y regulatorios.

Conclusión

La implementación de la pantalla para la validación de usuarios y el cálculo automático del CURP en el sistema Karpay no solo logró cumplir con los objetivos iniciales, sino que también dejó aprendizajes importantes sobre cómo diseñar soluciones eficientes y seguras en entornos bancarios, donde la precisión y la rapidez son muy importantes.

Desde el punto de vista práctico, se demostró que es posible automatizar el manejo de datos personales sin comprometer el rendimiento del sistema. Lograr este equilibrio entre seguridad y velocidad se basa en aplicaciones financieras, donde cada segundo cuenta y los errores no pueden ser permitidos.

En cuanto a la integración con otros módulos del sistema Karpay, se alcanzó una tasa de éxito del 98%, lo que evidencia una buena comunicación. Aunque se detectaron algunos errores menores durante las pruebas, estos fueron resueltos de forma rápida, lo que demuestra aún más la necesidad de mantener prácticas de prueba y mejora continua.

A nivel teórico, este trabajo reafirma el valor de la automatización como una herramienta para reducir errores humanos y mejorar la eficiencia operativa. Además, plantea nuevos desafíos, como el de asegurar que estas soluciones puedan mejorar sin perder estabilidad, o entender mejor cómo impactan en la experiencia del usuario.

Para terminar, sería recomendable realizar estudios que evalúen la escalabilidad de esta solución y su recepción por parte de los usuarios finales ya que esto no solo ayudaría a consolidar su efectividad actual, sino que también abriría la posibilidad de replicarla en otras instituciones financieras que enfrentan retos similares.

Referencias

- Herrera Mena, J. A., & Rodríguez Gutiérrez, J. C. (2024). Desarrollo de arquitecturas de software para la gestión eficiente de grandes volúmenes de datos. *Revista Científica de Ingeniería y Tecnología*, 6(1), 45-60. <https://www.researchgate.net/publication/390896840>
- ESET Latinoamérica. (2023, noviembre). Tendencias en ciberseguridad 2025: Privacidad, regulación y resiliencia. <https://web-assets.esetstatic.com/wls/es/articulos/reportes/cybersecurity-trends-2025-es.pdf>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2023). Fintech en América Latina y el Caribe: Un ecosistema consolidado con potencial para aportar a la inclusión financiera regional. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Fintech-en-América-Latina-y-el-Caribe-un-ecosistema-consolidado-con-potencial-para-aportar-a-la-inclusion-financiera-regional.pdf>
- Entel Digital. (2024). Reporte de Ciberseguridad 2025: Hacia una estrategia proactiva. https://enteldigital.cl/hubfs/ebooks/ciberseguridad/2025/Entel_Digital_Reporte_Ciberseguridad_2025_.pdf
- Centro de Modelamiento y Análisis de Sistemas Complejos (CMASCI). (2023). Automatización de procesos y productividad en el sector bancario. Recuperado el 15 de mayo de 2025, de <https://cmasci.cl/automatizacion-procesos-productividad-sector-bancario>
- Pérez Ramírez, L. J., & Méndez, A. C. (2024). Impacto de la inteligencia artificial en la precisión y eficiencia de los sistemas contables modernos. *Revista de Innovación Contable y Sistemas*, 9(1), 88-103. <https://www.researchgate.net/publication/382749692>
- Murillo, S., & Salazar, D. (2023). Automatización, ciberseguridad y ciencia de datos: Una nueva estrategia empresarial. Informe técnico. Instituto Tecnológico de Costa Rica. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/13722/Automatización_ciberseguridad_ciencia_datos_nueva_estrategia_empresarial.pdf
- Mejía, S. (2024). Optimización y automatización de procesos en la recopilación de informes contables. Trabajo de grado. Universidad de Antioquia. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/38590/4/MejiaSandra_2024_AutomatizacionInformesContables.pdf
- PwC México. (2024, junio 28). Transformación y automatización: innovando en los procesos financieros. <https://www.pwc.com/mx/es/liderazgo-estrategico/transformacion-y-automatizacion-financiera.html>
- TICNUS Technology Magazine. (2024). Transformación Digital en el Sector Bancario: Cómo la Automatización de Procesos Impulsa la Eficiencia y la Innovación. <https://ticnus.com/noticias/automatizacion-de-procesos/transformacion-digital-en-el-sector-bancario-como-la-automatizacion-de-procesos-impulsa-la-eficiencia-y-la-innovacion/>
- Innovación Industrial. (2024). Automatización en banca: seguridad y ahorro. <https://innovacionindustrial.net/tecnologia-financiera/automatizacion-banca-como-reduce-costos-mejora-seguridad/>
- Banco de México. (2025). Ciberseguridad en el sistema financiero. <https://www.banxico.org.mx/sistema-financiero/seguridad-informacion-banco.html>
- Condusef. (2025). Protección de Datos Personales. <https://www.condusef.gob.mx/?idc=1709&idcat=8&p=contenido>

Fotografías

<https://www.esic.edu/rethink/marketing-y-comunicacion/que-es-la-automatizacion-inteligente-y-que-beneficios-tiene-c>

¿Cómo Documentar la Memoria Histórica del Amazonas desde la Ingeniería?

Carlos Alejandro Gómez Albarracín¹, Albert Stiben Torres Merchán²,
Andrés Leonardo Durán Vivas³, Andrea Constanza Tijero Díaz⁴,
Juan José Ardila Garzón⁵, María Antonia Alfonzo Mujica⁶
y Diana Herrera Moyano⁷



Acerca de los autores

^{1y2} Estudiante de Ingeniería Multimedia, de la Facultad de Ingeniería -Universidad de San Buenaventura Sede Bogotá, en Colombia.

³ Director Programa Ingeniería Multimedia Universidad de San Buenaventura sede Bogotá, en Colombia.

^{4 y 5} Profesora de Ingeniería Multimedia Universidad de San Buenaventura Sede Bogotá, en Colombia.

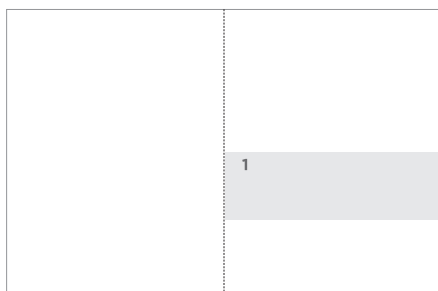
⁶ Capitana - Armada Nacional de Colombia.

⁷ Equipo académico - Armada Nacional de Colombia.

Resumen

La región del Amazonas colombiano enfrenta retos significativos en la preservación de su memoria histórica, debido al limitado acceso a tecnología, la pérdida de tradiciones orales y la compleja situación de conflicto en cuanto al orden social. Aunque existen esfuerzos institucionales, gran parte del conocimiento cultural está en riesgo de desaparecer.

Frente a esta realidad, se requieren enfoques innovadores que integren herramientas digitales y metodologías participativas. Proyectos como Colombia en RA y Borondo han explorado este camino, pero son escasos los estudios con un enfoque ingenieril aplicado a comunidades amazónicas.



<https://www.meer.com/es/74369-las-amazonas>

Este documento presenta los resultados del proyecto de investigación: “Corrientes de memoria: narrativa transmedia del Amazonas”, desarrollado por la Universidad de San Buenaventura y la Armada Nacional de Colombia. Surge entonces una pregunta central: ¿cómo, desde la ingeniería y mediante tecnologías interactivas, es posible contribuir a la preservación de la memoria histórica en contextos amazónicos? Cuestionamiento que dio lugar a este proceso investigativo, el cual lleva más de un año en curso y se ha realizado con la metodología de teoría fundamentada, dando especial protagonismo a la recolección de relatos de los diversos actores que habitan esta región.

Palabras clave: Narrativas transmedia, Preservación cultural, Comunidades Amazónicas, Aplicaciones interactivas, Innovación tecnológica.

Abstract

The Colombian Amazon region faces significant challenges in preserving its historical memory due to limited access to technology, the loss of oral traditions, and the complex conflict surrounding social order. Although institutional efforts exist, much of the cultural knowledge is at risk of disappearing.

Faced with this reality, innovative approaches that integrate digital tools and participatory methodologies are required. Projects such as Colombia en RA and Borondo have explored this path, but studies with an engineering approach applied to Amazonian communities are scarce.

This document presents the results of the research project “Currents of Memory: Transmedia Narrative of the Amazon,” developed by the University of San Buenaventura and the Colombian National Navy. A central question arises: how, through engineering and interactive technologies, is it possible to contribute to the preservation of historical memory in Amazonian contexts? This questioning gave rise to this research process, which has been ongoing for over a year and has been conducted using grounded theory methodology, with a special emphasis on collecting stories from the various actors who inhabit this region.

Keywords: Transmedia narratives, cultural preservation, Amazonian communities, interactive applications, technological innovation.

La Armada Nacional y la Construcción de Memoria Histórica

La Ley 1448 de 2011 establece que las instituciones del Estado deben contribuir a la construcción de la memoria histórica, responsabilidad que también recae en la Armada Nacional. Desde 2016, esta ha desarrollado iniciativas alineadas con dicho marco legal, buscando una memoria más inclusiva, donde no solo se escuchen voces institucionales, sino también las de las comunidades, visibilizadas desde su propia perspectiva.

En el Amazonas, el trabajo de la Armada Nacional de Colombia ha incluido métodos tradicionales como libros, artículos y seminarios. No obstante, ha surgido un interés por incorporar innovación tecnológica en este proceso. Si bien algunas bibliotecas amazónicas cuentan con recursos digitales para apoyar esta labor, muchas comunidades no poseen las capacidades para utilizarlos plenamente. Esto ha ocasionado la pérdida de narrativas locales, evidenciando la urgencia de implementar estrategias que faciliten la apropiación de tecnologías para preservar y difundir el patrimonio histórico.

El reto principal para la Armada, como equipo de investigación, ha sido diseñar métodos y herramientas tecnológicas actuales que fortalezcan este proceso. Además, era esencial que dichas estrategias resultaran innovadoras y atractivas, fomentando el interés y la participación activa de las comunidades involucradas en la preservación de su memoria.

Procedimientos tradicionales de documentación histórica y metodología aplicada

La documentación de la memoria histórica en el Amazonas ha sido clave para conservar el conocimiento y las experiencias de sus habitantes. Este proceso ha seguido dos enfoques principales: las fuentes primarias, representadas por las comunidades, y las fuentes secundarias, como registros históricos, bibliografía especializada y archivos institucionales.

Desde el ámbito investigativo y en el marco del presente proyecto, se han utilizado entrevistas, grupos focales con líderes comunitarios y observación participante. Estas herramientas han permitido obtener una visión integral de los aspectos culturales, sociales, económicos y políticos de la región.

Un método fundamental ha sido la transmisión oral, que ha facilitado el rescate de relatos sobre el origen de las comunidades, la colonización en zonas como Puerto Leguizamo, Leticia y Puerto Nariño, y las prácticas de subsistencia basadas en la agricultura, ganadería, pesca y avicultura. Los testimonios orales constituyen una fuente viva y auténtica que permite reconstruir la historia desde la voz de sus protagonistas.

En este sentido, “la Teoría fundamentada utiliza una serie de procedimientos que, a través de la inducción, generan una teoría explicativa de un determinado fenómeno estudiado” y suele ser muy abordada en análisis relacionados con temas sobre la conducta humana, especialmente en la disciplina de la sociología. Según Strauss y Corbin (1990) si se utiliza adecuadamente, se constituye en un método científico riguroso.

Por otra parte, en cuanto a la documentación recolectada, se ha recurrido a registros escritos, fotografías, archivos cartográficos y crónicas elaboradas por investigadores que han estado en el territorio previamente y también, que hacen parte de nuestro equipo de trabajo, así como por entidades públicas y privadas, que contribuyen a la construcción del marco referencial. En esta línea, la Armada Nacional ha desarrollado libros que integran entrevistas con la comunidad, material audiovisual y referencias bibliográficas, aportando a la preservación del patrimonio histórico del Amazonas.

De esta forma, tanto los testimonios de campesinos, como de indígenas, personal de la Armada y demás habitantes de la Amazonía constituyen el material con el cual se elaboraron los aplicativos ingenieriles. En general, se evidenció que la ubicación geográfica del Amazonas ha sido utilizada por grupos al margen de la ley para seguir cometiendo delitos como extracción ilegal de oro, la cual amenaza la tranquilidad de los pueblos indígenas y causa una devastadora contaminación por la utilización del mercurio. Así mismo, pese a los esfuerzos de la Armada nacional, se sigue presentando el tráfico de estupefacientes y de algunas especies, pues lamentablemente las diferentes afluentes del río son utilizadas para camuflar el transporte de diversas cargas.

Pese a esto, tanto las poblaciones lugareñas como el personal de la Armada siguen manteniendo las dinámicas culturales de la zona, por medio de prácticas de cuidado de la fauna y flora, y la realización de actividades de forma mancomunada.

Aplicativos ingenieriles para la documentación de memoria histórica

Como punto de partida, se realizaron actividades de campo en Leticia y Puerto Leguízamo, donde se recopilaban testimonios de los habitantes con el fin de documentar su historia y experiencias de vida en el contexto amazónico. A partir de estos relatos, se extrajo información relevante, la cual fue integrada en productos digitales orientados a informar a las nuevas generaciones y fomentar la apropiación tecnológica en la región.

Uno de los principales resultados fue la creación de un sitio web dedicado a la memoria histórica: “Corrientes de memoria”. Esta plataforma tiene como propósito facilitar el acceso a los contenidos mediante una estructura clara y dinámica. Contiene secciones con narrativas comunitarias, datos del proyecto y enlaces a otros productos digitales. La navegación se complementa con microinteracciones que enriquecen la experiencia del usuario y agilizan la búsqueda de información.

Adicionalmente, se realizaron nueve documentales, los cuales recogen experiencias significativas de los pobladores de la Amazonía. Mediante entrevistas, registros en video y una narrativa estructurada, se presentan distintas perspectivas sobre problemáticas sociales y ambientales. Entre los temas abordados se incluyen la deforestación, el cambio climático y las relaciones transfronterizas. Estas situaciones se han visto influenciadas por la presencia institucional, especialmente por las acciones de vigilancia y apoyo de la Armada Nacional de Colombia.

El contenido audiovisual está orientado a públicos diversos. Para audiencias jóvenes se diseñaron videos breves y verticales; para espectadores adultos, se elaboraron piezas de seis minutos de duración. Estas producciones serán difundidas en espacios como el Buque Escuela ARC Gloria y eventos como la Feria Internacional del Libro de Bogotá, FILBO, con el objetivo de alcanzar una mayor visibilidad nacional e internacional.

Otro de los productos desarrollados fue una experiencia de realidad virtual (VR), diseñada para simular el recorrido por el río Amazonas a bordo de una embarcación. La ambientación se logró mediante la integración de datos proporcionados por la comunidad y la Armada. Dentro del entorno virtual se encuentra un modelo 3D del buque ARC Reyes, elaborado con alto nivel de detalle para ofrecer una experiencia inmersiva que combina entretenimiento y aprendizaje. Este prototipo fue creado utilizando el motor Unity, junto con el kit de desarrollo (SDK) de Meta Quest. Gracias a estas herramientas, se habilitaron interacciones precisas que replican con fidelidad la sensación de estar dentro del barco. El usuario puede explorar sus espacios, conocer funciones de la tripulación y acceder a información adicional sobre la labor institucional en la región.

Asimismo, se diseñó un videojuego que simula las labores operativas de la Armada Nacional en el Amazonas. En este entorno tridimensional, el jugador puede controlar el cañonero fluvial ARC Leticia y recorrer el río. La narrativa se enfoca en tareas como patrullajes, cuidado ambiental y asistencia humanitaria, destacando el impacto positivo de estas acciones en la protección del territorio y el bienestar comunitario.

Así mismo, se incorporó un módulo de realidad aumentada (AR) en la plataforma web, el cual fue desarrollado con la biblioteca AR.js, permitiendo que los usuarios escaneen códigos QR desde navegadores convencionales.

Los marcadores están ubicados en una maqueta representativa del Bongo Hospital, embarcación que presta servicios médicos en zonas de difícil acceso. El Bongo Hospital constituye una herramienta esencial de atención integral. Su labor incluye consultas de medicina general, odontología, pediatría, ginecología, psicología y fisioterapia. Además, promueve actividades de prevención en salud. La embarcación recorre distintos puntos del Amazonas, contribuyendo al fortalecimiento del sistema de salud y la calidad de vida de las comunidades ribereñas.

Por último, la elaboración del libro: El río y sus ecos: Narrativas de los pobladores y la Armada Nacional del Amazonas colombiano, pese a que no se constituye en un prototipo ingenieril, es el resultado de la reflexión y el análisis de estudiantes e investigadores del proyecto en relación con la problemática de la región. Éste contempla testimonios, referentes teóricos y aprendizajes de esta experiencia.

Los retos en el desarrollo de los aplicativos ingenieriles

Durante el desarrollo de cada producto se suscitaron retos y dificultades en la realización de cada uno. En el inicio del proyecto se hicieron viajes a la región de la Amazonia en donde se transportaron distintos dispositivos electrónicos, desde cámaras, micrófonos, trípodes y dron, los cuales tuvieron dificultades de funcionamiento debido a la humedad y las altas temperaturas que se encontraban en ese momento, razón por la cual los dispositivos se sobrecalentaron y funcionaban de forma incorrecta.

Debido a esto para realizar una grabación o entrevista se requería de tiempo extra para que el dispositivo recupera nuevamente su temperatura adecuada. Por otra parte, también se encontraron problemas de movilidad ya que en varias de las zonas visitadas no se cuenta con carreteras, factor que dificulta el transporte hacia otra ubicación y fue necesario hacer largos recorridos a pie. Además, en cuanto a la comunicación, la falta de cobertura en ciertas áreas complicó la coordinación y el acceso oportuno a información clave, lo que representó un reto adicional para la planificación y ejecución de las actividades en el territorio.

Expectativas de distribución de aplicativos ingenieriles

La distribución de los aplicativos busca preservar la memoria histórica de las comunidades amazónicas. En el trabajo de campo en Leticia y Puerto Nariño, se identificó la preocupación de los pueblos indígenas por la extracción de información sin retorno, pues proyectos como *Colombia en Realidad Aumentada*, posibilitaron la creación de experiencias interactivas en Realidad Aumentada para fortalecer la identidad histórica, cultural y patrimonial de territorios como Barranquilla, Santa Marta, Valledupar y La Guajira, ejercicio interesante, pero que no es accesible para las comunidades que participaron de ello con información de primera mano.

Frente a esto, se plantean materiales interactivos y accesibles, vinculados con tecnologías actuales, que puedan ser consultados tanto por estas comunidades como por públicos externos interesados en su conocimiento. En el ámbito institucional, los aplicativos se proyectan como recursos pedagógicos para la formación de oficiales, suboficiales e infantes de marina. Su integración a los programas permitirá fortalecer el entendimiento de la región amazónica, su historia y dinámicas sociales, con el fin de mejorar el desempeño operativo y la relación con las poblaciones locales. Además, la

asociación con la Armada posibilita la socialización de los productos con diversas comunidades a lo largo y ancho del Amazonas.

La tercera vía contempla una estrategia de divulgación en colaboración con la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, y otras entidades. Se prevé la difusión de los productos mediante plataformas digitales, eventos académicos y culturales.

Finalmente, se promoverá su circulación en espacios académicos, tales como congresos, publicaciones científicas y ferias del libro, facilitando el intercambio de saberes y el reconocimiento de estas comunidades.

Conclusión general

El proyecto “Corrientes de memoria: narrativa transmedia del Amazonas”, evidencia el potencial de las tecnologías interactivas, como la realidad virtual, la realidad aumentada y los videojuegos, en la documentación de la memoria histórica en territorios con baja conectividad y alta riqueza cultural como el Amazonas. Desde una perspectiva práctica, los aplicativos desarrollados permitieron crear experiencias significativas para comunidades locales y usuarios externos, al tiempo que fortalecieron vínculos institucionales entre la academia, la Armada Nacional de Colombia y los habitantes amazónicos. Este trabajo demuestra que es posible combinar innovación tecnológica y participación comunitaria para preservar saberes y narrativas que, de otro modo, corren el riesgo de desaparecer.

A nivel teórico, la experiencia contribuye al campo de las narrativas digitales y la memoria como construcción social, proponiendo un modelo replicable para otras regiones del país. Las estrategias de co-creación y el enfoque transmedia permitieron que las comunidades no solo fueran representadas, sino que también se convirtieran en autoras de su propia historia. Como lo plantea Paul Ricoeur (2000), “la memoria histórica es un proceso fundamental para la construcción de identidad y la transmisión del conocimiento a lo largo del tiempo”, y este proyecto aporta herramientas concretas para asegurar dicha transmisión desde la ingeniería.

Referencias

- Agüero Bravo, F. (2021). Aplicación de las TIC y realidad aumentada como iniciativa para la puesta en valor del patrimonio arquitectónico. *Tecnología en Marcha*, 34(Extra 5), 62-77. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8158927>
- Boboc, R. G., Băutu, E., Gîrbacia, F., Popovici, N., & Popovici, D.-M. (2022). Augmented reality in cultural heritage: An overview of the last decade of applications. *Applied Sciences*, 12(19), 9859. <https://doi.org/10.3390/app12199859>
- Bonifaz, E., & Molina, F. (2015). Realidad aumentada y su aporte al patrimonio cultural. *ResearchGate*.
- Eve Museografía. (2025). Conservación del Patrimonio Cultural y Narrativas Digitales.
- Fundación Cultural Territorios, Arte y Paz. (2024). Colombia en Realidad Aumentada. <https://sites.google.com/view/territoriosarteypaz/nuestros-proyectos/colombia-en-realidad-aumentada>
- Fundación Santa María la Real & Integra. (2025). Alianza estratégica para unir tecnología y patrimonio.
- Fundación Universidad de Bogotá - Jorge Tadeo Lozano. (2021). CrossmediaLab, una apuesta pedagógica para la memoria histórica y la paz de Colombia. <https://colab.colombiaaprende.edu.co/experiencias/crossmedialab-una-apuesta-pedagogica-para-la-memoria-historica-y-la-paz-de-colombia/>
- García Medina, M. A., Lengua Cantero, C., & Flórez Barboza, W. (2018). Realidad aumentada en museos para la preservación de la etnoidentidad Zenú. En *Interculturalidad de las etnias en Colombia* (pp. 30-49). <https://doi.org/10.21892/9789588557601.2>
- Gómez Rojas, Y. E. (2024). Construcción de la memoria histórica, a partir de la narrativa oral de las víctimas del conflicto armado [Monografía de grado, UNAD]. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/62796>
- Green, C. (2023). Augmenting Heritage: An Open-Source Multiplatform AR Application. *arXiv*.
- Integratecnologia.es. (2024). La revolución del Patrimonio Digital: Cómo la tecnología está transformando la conservación cultural.
- Jaramillo Marín, J., Berón Ospina, A. A., & Parrado Pardo, E. P. (2020). Perspectivas disruptivas sobre el campo de la memoria en Colombia. *Utopía y Praxis Latinoamericana*, 25(esp.4), 162-175. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3931063>
- Pacheco Mier, A., Orozco Peña, M. A., & Camelo Mendoza, R. N. (2023). Reconstrucción de Memoria Histórica y Desarrollo del Tejido Social en Comunidades Afrocolombianas Víctimas de la Masacre de Bojayá. *Ciudad Paz-ando*, 16(2), 7-19. <https://doi.org/10.14483/2422278X.21011>
- 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>
- Ricoeur, P. (2000). *La memoria, la historia, el olvido*. Fondo de Cultura Económica.
- Rodríguez Pinzón, E. M. (2020). Colombia. La construcción de una narrativa de la memoria histórica como proceso político. *Historia y Memoria*, (21), 109-135. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7478821>
- Ruiz Torres, D. (2012). La realidad aumentada: un nuevo recurso dentro de las TIC para los museos del siglo XXI. *Intervención*, 3(5), 39-44. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-249X2012000100006
- Strauss, A. I. y Corbin, J. (1990). *Basics of Qualitative Research: Grounded Theory, procedures and techniques*. Sage Publications.
- Universidad Autónoma de Occidente. (s.f.). 'Borondo', una aventura en RA para conocer el patrimonio cultural de Colombia. <https://www.uao.edu.co/ingenieria/borondo-una-aventura-en-realidad-aumentada-para-conocer-el-patrimonio-cultural-de-colombia/>
- Universidad de los Andes. (s.f.). Ríos: Arte, tecnología e interacción para narrar el conflicto armado en Colombia.
- Ye, S., Wu, T., Jarvis, M., & Zhu, Y. (2020). Digital Reconstruction of Elmina Castle for Mobile Virtual Reality via Point-based Detail Transfer. *arXiv*. Figuras

Fotografías

<https://www.meer.com/es/74369-las-amazonas>

Modelo Predictivo para la Gestión de Incendios Forestales en Michoacán con Redes Neuronales

José Luis Martínez Alcántar¹, Jhacer Kharen Ruiz Garduño², Gabriel Mora Patiño³ y Samuel Efrén Viñas Álvarez⁴



Resumen

Este estudio presenta un modelo predictivo basado en redes neuronales para estimar la superficie afectada por incendios forestales en Michoacán, con el objetivo de optimizar la gestión de recursos. Se analizaron 929 registros históricos de incendios ocurridos entre 2015 y 2024 en 18 localidades, incluidas seis dentro del santuario de la mariposa monarca. Utilizando variables como costo operativo, duración, impacto y personal combatiente, se compararon modelos de aprendizaje automático: regresión lineal, árboles de decisión, Random Forest y una red neuronal. Esta última

Acerca de los autores

^{1, 2, 3, 4} Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Zitácuaro, Laboratorio Nacional CONAHCYT en Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos.

alcanzó el mejor desempeño con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.84. El análisis identificó al personal combatiente, el impacto y la duración como los factores más relevantes. Los resultados pueden apoyar una mejor planificación y toma de decisiones en la prevención y combate de incendios forestales en la región.

Palabras clave: incendios forestales, predicción, redes neuronales artificiales, Michoacán.

Abstract

This study presents a predictive model based on neural networks to estimate the area affected by forest fires in Michoacán, with the aim of optimizing resource management. A total of 929 historical fire records from 2015 to 2024 were analyzed across 18 localities, including six within the Monarch Butterfly Sanctuary. Using variables such as operational cost, duration, impact, and firefighting personnel, different machine learning models were compared: linear regression, decision trees, Random Forest, and a neural network. The latter achieved the best performance, with a coefficient of determination (R^2) of 0.84. The analysis identified firefighting personnel, impact, and duration as the most relevant factors. The results can support improved planning and decision-making in the prevention and management of forest fires in the region.

Keywords: forest fires, prediction, artificial neural networks, Michoacán.

Introducción

En México, al igual que en otros países, existen grandes extensiones de bosques propensos a los incendios forestales debido a diversas causas, entre las que destacan los factores geográficos que influyen en su propagación y características. (Chuvienco et al., 1998) afirman que “el fenómeno de los incendios forestales tiene una clara manifestación territorial, y que los factores, al igual que los efectos, están distribuidos en el espacio y son afectados por él” (citado en Neger et al., 2022, p. 2). Históricamente, en México, el promedio anual de incendios entre 2016 y 2023 ha sido de 7,409.75. Sin embargo, desde 2020, se observa un incremento sostenido en el área afectada por estos fenómenos; es decir, en los últimos cuatro años, los incendios han consumido una mayor superficie forestal y presentan una preocupante tendencia al alza.

Los incendios forestales pueden ocasionar daños que varían desde leves hasta severos, dejando una significativa huella ambiental tanto a corto como a largo plazo. Entre sus impactos se incluyen desequilibrios en la cadena alimentaria, daños a la flora, erosión del suelo, pérdida de hábitats de fauna silvestre, alteraciones climáticas, contaminación del aire y del agua, además de cuantiosas pérdidas económicas. Estos fenómenos han sido analizados desde diversas perspectivas, incluyendo sus causas, que abarcan actividades como las quemas agrícolas (Bassaber et al., 2024; Vilchis et al., 2018), incluyendo la quema de cultivos de caña de azúcar, así como la limpieza de terrenos y las quemas intencionales asociadas con actividades agrícolas (España et al., 2024; Vilchis et al., 2015; Huerta et al., 2024).

En este contexto, diversos autores han señalado que las causas antropogénicas (derivadas de la intervención humana, ya sea accidental o intencional) son las principales detonantes, (Román y Martínez, 2006; Ibarra y Huerta, 2016;



<https://www.iqair.com/mx/newsroom/spotlight-de-mapa-de-incendios-forestales-incendios-forestales-de-fairbanks>

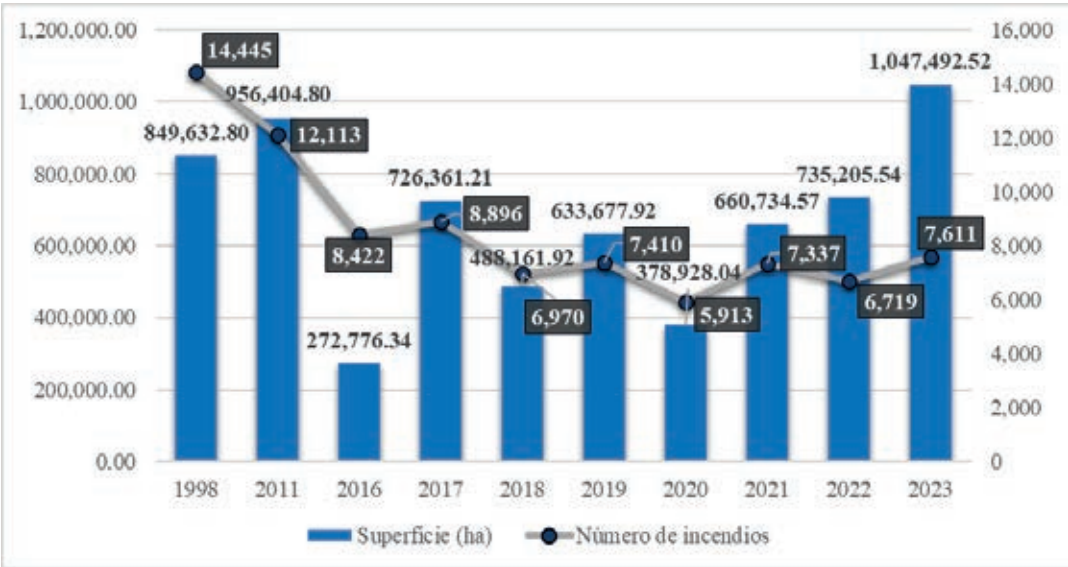
Martínez y Ezequiel, 2023; Neger *et al.*, 2022); se encontró que más del 99% de los incendios se deben a la intervención humana, siendo éste el factor más importante de la ocurrencia de estos eventos, lo que concuerda con éstos autores, dejando claro que se han tenido avances considerables en el uso de técnicas y herramientas para la prevención, predicción y monitoreo de incendios forestales, pero no se ha avanzado en el uso de las tecnologías de la información para la gestión de los recursos humanos, financieros y materiales que se utilizan durante los incendios.

Por otro lado, autores como (Bassaber *et al.*, 2024; Ibarra y Huerta, 2016; Flores, 2021) han investigado las consecuencias de los incendios forestales, destacando problemas como la degradación de la capa vegetal, la pérdida de hábitats, la alteración de los ciclos de regeneración, la mortalidad de animales, la contaminación de aguas subterráneas, los efectos en la salud de las personas cercanas a áreas propensas, y la erosión del suelo. Otro aspecto recurrente en la investigación son las estrategias de gestión de incendios, que abarcan desde la prevención, coordinación, mitigación, monitoreo, restauración (Bassaber *et al.*, 2024; González *et al.*, 2023; Pérez *et al.*, 2024), hasta el financiamiento (Román y Martínez, 2006). Sin embargo, pocos estudios abordan las políticas y medidas regulatorias para la gestión y recuperación de las áreas afectadas (Cruz y Bulnes, 2019; Bassaber *et al.*, 2024), mientras que otros se enfocan en analizar el impacto de los incendios considerando indicadores como frecuencia, temperatura ambiental, duración y extensión afectada (Santelices *et al.*, 2022; Perello *et al.*, 2024; González y Ortiz, 2022).

Figura 1

Comparativo de incendios y superficie afectada en hectáreas al corte de 1998, 2011, 2016 al 2023.

Históricamente en México, la tendencia en la cantidad de incendios de 2016 al 2023, se ha mantenido con una media de 7,409.75 incendios por año, sin embargo, se aprecia una predisposición positiva a partir del 2020, en la cantidad de hectáreas afectadas por estos fenómenos; es decir, en los últimos 4 años se ha consumido una mayor cantidad de área forestal y muestran una tendencia al alza (Figura 1). Las diez principales entidades



Nota. Tomado de Comisión Nacional Forestal, cierre estadístico 2023, (CONAFOR, 2024).

federativas con el mayor número de siniestros y superficie afectada se pueden apreciar en la Tabla 1. Por otro lado, existen zonas de territorio que han sido poco afectadas por actividades humanas y que han sido declaradas como áreas protegidas, que suman 182 (ciento ochenta y dos) y representan una superficie de 908,395.20 km² (CONABIO).

TABLA 1.
ENTIDADES CON MAYOR NÚMERO DE SINIESTROS Y DE SUPERFICIE AFECTADA EN MÉXICO.

NÚMERO DE INCENDIOS			SUPERFICIE AFECTADA (HA)		
1	Jalisco	297	1	Sonora	38,791.74
2	Guerrero	94	2	Guerrero	22,058.76
3	Ciudad de México	79	3	Jalisco	16,338.46
4	Morelos	74	4	Coahuila	9,789.11
5	Chiapas	65	5	Nayarit	6,038.18
6	Michoacán	54	6	Michoacán	4,347.75
7	Sonora	53	7	Zacatecas	3,027.64
8	México	48	8	Chiapas	2,584.67
9	Colima	42	9	Tamaulipas	2,100.56
10	Zacatecas	37	10	Oaxaca	1,864.40

Nota. Adaptado de Comisión Nacional Forestal, cierre estadístico 2023, (CONAFOR, 2024). El número de incendios en estos 10 estados representan el 73% y respecto a la superficie afectada el 89% del país.

A pesar de los esfuerzos en la prevención y mitigación de incendios forestales, no se han identificado estudios que evalúen de manera integral el impacto de la gestión de recursos humanos, materiales y financieros en la eficiencia de la respuesta a estos eventos. En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo diseñar un modelo de gestión basado en Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) que permita predecir el impacto que tendrá un incendio (cantidad de hectáreas forestales afectadas) basado en datos históricos, con lo cual se optimizará la toma de decisiones en los centros de control de incendios forestales. Se espera que este enfoque contribuya a reducir los tiempos de respuesta, mejorar la asignación de recursos y minimizar tanto los costos operativos como el impacto ambiental.

El uso de TIC en la gestión de incendios ofrece ventajas significativas, como una mejor coordinación entre equipos de respuesta, la optimización del monitoreo en tiempo real y el uso de herramientas predictivas basadas en datos históricos. Al integrar metodologías estadísticas y modelos de aprendizaje automático, esta investigación busca responder a la siguiente pregunta: ¿Cómo puede un modelo de gestión basado en TIC mejorar la

eficiencia en la respuesta a incendios forestales, optimizando recursos y reduciendo su impacto ambiental?

Neger, Manzo y Galicia (2022), recopilaron avances de estudios geográficos sobre incendios forestales, hallazgos y relevancia de los mismos e identificación de retos y oportunidades futuras en México; destaca la revisión de literatura empleando un análisis bibliométrico y la integración temática de la literatura generada por geógrafos y entidades geográficas. Concluyendo que, aunque la contribución de la geografía a este campo ha aumentado en los últimos años, sigue siendo limitada en términos de artículos indizados, lo que destaca la necesidad de continuar fortaleciendo la investigación geográfica en incendios forestales en México.

1. Procedimientos experimentales

Esta investigación sigue un enfoque cuantitativo con un diseño predictivo, cuyo objetivo es desarrollar un modelo de aprendizaje automático para estimar la superficie afectada por incendios forestales en la región oriente del estado de Michoacán. El análisis se realizó utilizando un conjunto de 929 registros históricos de incendios forestales ocurridos entre 2015 y 2024, en 16 municipios: Angangueo, Aporo, Benito Juárez, Contepec, Epitacio Huerta, Hidalgo, Irimbo, Jungapeo, Maravatío, Ocampo, Senguio, Susupuato, Tlalpujahua, Tuxpan, Tuzantla y Zitácuaro. Esta zona es de alto interés ambiental, ya que algunos municipios forman parte de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca.

Los datos fueron recopilados del Centro de Mando Regional de Control de Incendios en la región oriente de Michoacán. Cada registro incluye información relevante sobre la fecha, ubicación, causa y recursos utilizados en el combate del incendio. Para la predicción de la superficie afectada (variable objetivo), se seleccionaron las siguientes variables: Mes del incendio, Costo operativo del combate del incendio, Duración del incendio en horas, Personal combatiente desplegado, Causa del incendio (codificada), Causa específica del incendio (codificada), Tipo de impacto del incendio (codificado). Dado que los datos climáticos presentaban inconsistencias en su captura o no aparecen debido a variaciones en los formatos de Excel en algunos años, no fueron considerados en el modelo predictivo.

2. Resultados

El modelo desarrollado en este estudio permitió predecir la superficie afectada por incendios forestales en municipios de la región oriente del estado de Michoacán. Para evaluar su desempeño, se compararon tres algoritmos de regresión y una red neuronal basada en una arquitectura de Perceptrón Multicapa (MLP, Multi-Layer Perceptron), implementada con la biblioteca TensorFlow y Keras. Se entrenaron y evaluaron tres modelos convencionales de aprendizaje automático (Tabla 2) encontrando que el modelo de regresión lineal asume que existe una relación lineal entre las variables y la variable objetivo (superficie afectada), aunque su precisión fue inferior en comparación con los otros modelos más complejos sirve como línea base; el árbol de decisión segmenta el espacio de predicción mediante reglas de decisión simples, mostrando el peor de los modelos evaluados, lo que indica una menor capacidad para generalizar los patrones del conjunto de datos y el modelo basado en la combinación de múltiples árboles de decisión logró un mejor equilibrio entre sesgo y varianza con un RMSE de 20.08.

TABLA 2.
RAÍZ DEL ERROR CUADRADO MEDIO DE MODELOS DE ALGORITMOS DE REGRESIÓN.

Modelo	RMSE (menos es mejor)
Regresión Lineal	25.13
Random Forest	20.08
Árbol de Decisión	43.56

El modelo de Random Forest obtuvo el menor error cuadrático medio (RMSE = 20.08), superando a la Regresión Lineal (RMSE = 25.13) y al Árbol de Decisión (RMSE = 43.56). Esto indica que los modelos basados en árboles pueden capturar mejor la relación entre las variables predictoras y la superficie afectada.

Para mejorar la precisión en la predicción de la superficie afectada por incendios forestales, se implementó una red neuronal artificial con arquitectura multicapa (MLP, por sus siglas en inglés). Esta red se compone de una capa de entrada, tres capas ocultas densas y una capa de salida. Las capas ocultas utilizan funciones de activación ReLU, regularización L2 para prevenir sobreajuste, y capas de Dropout con una tasa del 10% para mejorar la generalización.

Este modelo logró un Error Absoluto Medio (MAE) de 0.2235, un Error Cuadrático Medio (MSE) de 0.5657 y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.84, superando a los modelos de regresión tradicionales. Estos resultados indican que la red neuronal es capaz de capturar relaciones no lineales complejas entre las variables, lo que la convierte en una herramienta potente para la predicción y planificación en la gestión de incendios forestales. Por lo tanto, la red neuronal es capaz de explicar el 84% de la variabilidad en la superficie afectada por incendios, superando a los modelos tradicionales en precisión.

En la Figura 2, se muestra el comportamiento del Error Absoluto Medio (MAE) durante el proceso de entrenamiento y validación. En esta gráfica se observa una disminución progresiva del error a medida que avanza el entrenamiento, estabilizando en un valor final de aproximadamente 0.2235. Este resultado respalda la eficiencia del modelo, evidenciando que no solo alcanza un buen nivel de precisión, sino que además mantiene una adecuada capacidad de generalización.

El uso de redes neuronales mostró una mejora significativa en la precisión frente a los modelos de regresión tradicionales. Aunque el modelo Random Forest obtuvo un RMSE de 20.08, la red neuronal superó este desempeño al capturar relaciones más complejas entre las variables. Esto sugiere que los modelos de aprendizaje profundo pueden ser herramientas clave en la gestión y respuesta ante incendios forestales, al facilitar la planificación eficiente de recursos y estrategias de mitigación. Además, la capacidad de predecir la superficie afectada desde las primeras etapas del incendio permite tomar decisiones informadas basadas en evidencia histórica y datos operativos.

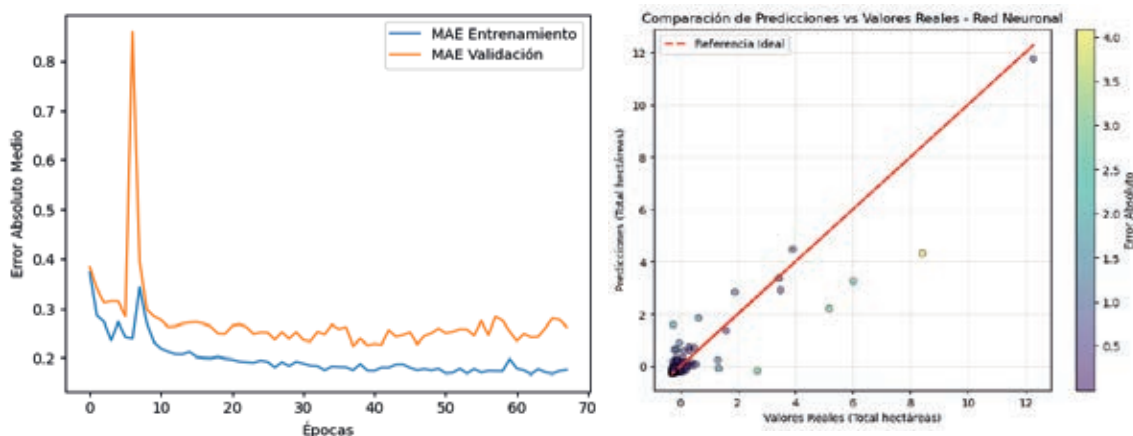


Figura 2

MAE de entrenamiento y validación del modelo de red neuronal.

Conclusiones

La asignación de recursos destinados a combatir incendios forestales, provenientes de dependencias como CONAFOR, municipios y particulares, muestra una variabilidad significativa. Aunque no fue posible acceder a datos detallados sobre la distribución de estos recursos, la información analizada refleja un incremento anual en su uso, incluyendo la movilización de brigadistas y equipos especializados. Este patrón es consistente con los hallazgos del modelo predictivo, donde el personal combatiente fue la variable con mayor impacto en la predicción de la superficie afectada. Estos resultados resaltan la importancia de una mejor planificación de recursos basada en datos históricos y modelos de inteligencia artificial, lo que podría optimizar la gestión y respuesta ante incendios forestales.

A partir del análisis de un conjunto de 929 registros históricos (2015-2024), se evaluaron distintos modelos de regresión y una red neuronal con arquitectura MLP (Perceptrón Multicapa), obteniendo resultados significativos en términos de precisión y aplicabilidad. El análisis de importancia de variables reveló que el número de brigadistas desplegados tiene el mayor impacto en la predicción de la superficie afectada (34%), lo que sugiere que la cantidad de recursos humanos disponibles influye significativamente en el control del incendio. Otras variables clave fueron el tipo de impacto del incendio (22%), la duración del evento (20%) y la causa del incendio (8%), lo que resalta la importancia de evaluar tanto las características del incendio como los esfuerzos de respuesta.

El modelo de red neuronal superó a los modelos tradicionales en precisión, siendo el mejor modelo la regresión (Random Forest) alcanzando un RMSE de 20.08, la red neuronal logró un R^2 de 0.84, explicando el 84% de la variabilidad en la superficie afectada por incendios, además el modelo redujo el MAE a 0.2235, mejorando notablemente la precisión de las predicciones. Aunque la influencia del clima en los incendios es innegable, la falta de registros confiables impidió su uso en el modelo. Esto resalta la necesidad de mejorar la calidad y disponibilidad de estos datos en futuras investigaciones, asimismo, la implementación de redes neuronales demuestra el potencial del aprendizaje profundo para optimizar la gestión de recursos en la prevención y combate de incendios forestales, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informada y oportuna.

Referencias

Bassaber Zúñiga, A. I., Maldonado Villegas, M. M., Curiel Guevara, S., Rojas Arias, M. L., & Valdez Rosas, J. S. (2024). *Revisión de causas, consecuencias y medidas de respuesta frente a los incendios forestales: un enfoque en el estado de Jalisco*. Revista Científica e-cucba, <https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi21.327>, ENERO-JUNIO 2024, ISSN: 2448-5225, 100-114.

CONABIO. (2024). *Áreas protegidas, Biodiversidad Mexicana*. Obtenido de <https://www.biodiversidad.gob.mx/region/areasprot>

CONAFOR. (2024). <https://www.gob.mx/conafor/>. Obtenido de Reporte semanal de incendios: <https://www.gob.mx/conafor/documentos/reporte-semanal-de-incendios>

Cruz Núñez, X., y Bulnes Aquino, E. (2019). *Emission impact of wildfires: El Tepozteco 2016*. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Atmósfera, *Atmósfera* 32(2), 85-93 (2019) DOI: 10.20937/ATM.2019.32.02.01.

España Boquera, M., Champo Jiménez, O., y Uribe Salas, M. (2024). *Extensión y severidad de incendios forestales en Michoacán en 2021 a partir de imágenes Sentinel-2*. Polibotánica Núm. 57, enero 2024 ISSN electrónico: 2395-9525, DOI: 10.18387/polibotanica.57.7, Instituto Politécnico Nacional, 125-144.

Flores Garnica, J. G. (2021). *Antecedentes y perspectivas de la investigación en incendios forestales en el INIFAP*. Revista Mexicana de Ciencias Forestales Vol. Especial, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.981>.

González Gutiérrez, I., Farfán Gutiérrez, M., Morales Manilla, L. M., Pérez Salicrup, D. R., Garza Saldaña, J. J., y Medina Puente, A. (2023). *Índices y modelos para la predicción de la ocurrencia de incendios forestales: una revisión para México*. Revista Geográfica de América Central, 2(71), <https://doi.org/10.15359/rgac.71-2.7>, 193-219.

González R., A., y Ortiz P., C. F. (2022). *Superficie forestal afectada por incendios en México: apuntes iniciales hacia un modelo de manejo preventivo*, <https://doi.org/10.15359/rca.56-1.1> Open Access: www.revistas.una.ac.cr/ambientale. Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci) e-ISSN: 2215-3896, Vol 56(1): 1-27.

Huerta Silva, M. H., Parra Vázquez, M. R., y Ianni, E. (2024). *Relación entre pobreza y conservación del capital natural desde los Medios de Vida Sustentables en Villaflores, Chiapas, México*. Revista de Ciencias Ambientales, vol. 58, núm. 1, 19352, 2024, Enero-Junio Universidad Nacional DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.58-1.9> <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=665077097007>.

Ibarra Montoya, J. L., y Huerta Martínez, F. M. (2016). *Cambio climático y predicción de incendios al 2050 en el Bosque La Primavera, Jalisco*. Revista Mexicana de Ciencias Forestales Vol. 7 (37), 39-50.

Martínez Saucedo, A., y Ezequiel Inchausti, P. (Octubre de 2023). *Predicción de incendios forestales mediante modelos de machine learning*. Obtenido de Evento: XXVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC) (La Rioja, 3 al 6 de octubre de 2022) Institución de origen: Red de Universidades con Carreras en Informática ISBN: 978-987-1364-31-2: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/149568>

Neger, C., Manzo, D. L., & Galicia, S. L. (Agosto de 2022). *La investigación geográfica de los incendios forestales en México: una perspectiva bibliométrica y territorial*. Obtenido de Investigaciones geográficas UNAM, eISSN: 2448-7279, DOI: <https://doi.org/10.14350/rig.60488>, Núm. 108, 2022, e60488: <http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/>

Neger, C., León Cruz, J. F., Galicia Sarmiento, L., y Manzo Delgado, L. d. (2022). *Dinámica espaciotemporal, causas y efectos de los megaincendios forestales en México*. Madera y bosques, vol. 28, núm. 2, e2822453, DOI: 10.21829/myb.2022.2822453.

Pérez Bertozzi, L., Vega Araya, M., Díaz Orías, J., y Guadamuz Eras, D. (2024). *Determinación de los efectos ambientales causados por eventos hidrometeorológicos extremos que inciden en el manejo del fuego en sitios del Área de Conservación Guanacaste (ACG), Guanacaste, Costa Rica*. Revista de Ciencias Ambientales, Tropical Journal of Environmental Sciences, ISSN: 1409-2158, ISSN: 2215-3896, Universidad Nacional, DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.58-1.12>.

Román Cuesta, R. M., y Martínez Vilalta, J. (2006). *Effectiveness of Protected Areas in Mitigating Fire within Their Boundaries: Case Study of Chiapas, Mexico*. Conservation Biology Volumen 20, No. 4, 1074-1086, Society for Conservation Biology, DOI: 10.1111/j.1523-1739.2006.00478.x.

Santelices Moya, R., Cabrera Ariza, A., Silva Flores, P., y Navarro Cerrillo, R. M. (2022). *Assessment of a wildfire in the remaining Nothofagus alessandrii forests, an endangered species of Chile, based on satellite Sentinel-2 images*. International Journal of Agricultura and Natural Resources, 49(2):85-96. 2022 DOI 10.7764/ijanr.v49i2.2337 www.ijanr.cl.

Vilchis Francés, A. Y., Díaz Delgado, C., Magaña Lona, D., Ba, K. M., y Gómez Albores, M. A. (2015). *Modelado espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la cuenca del río balsas*. Agrociencia 49, 803-820.

Vilchis Francés, A., Díaz Delgado, M., Gómez Albores, M., Becerril Piña, R., y Loza Mastachi, C. (2018). *Modelado de dinámica de sequías para predicción de incendios forestales*. Aqua-LAC Vol. 10 - No. 2, marzo-septiembre, ISSN: 16882873, 13-21.

Fotografías

<https://www.mexicoambiental.com/amazonas-estuvo-bajo-mar-dos-veces/>

Navegando Historias: Memoria Amazónica y Narrativas Transmedia desde la Armada y la Academia

Lukas Santiago Chinome Pérez*, Daniel Fernando Fiquitiva Pizza*,
Andrés Leonardo Duras* Vivas, Diana Herrera Moyano*,
María Antonia Alfonzo Mujica*



Resumen

Acerca de los autores

*Ingeniería Multimedia, Universidad de San Buenaventura, Bogotá, Colombia.

El proyecto *Corrientes de Memoria Histórica: Narrativas Transmedia del Amazonas*, se desarrolló en colaboración entre la Universidad de San Buenaventura y la Armada Nacional de Colombia, con el objetivo de visibilizar la memoria histórica de las comunidades amazónicas y la labor

institucional en la región. A través de herramientas transmedia, se consolidaron cinco productos digitales: un libro, una serie documental, un videojuego, un recorrido en realidad virtual y una plataforma interactiva. Estos lograron una mayor interacción con el público y lograron generar una respuesta asertiva en la difusión del conocimiento histórico de la región. Durante las sesiones de investigación, se realizaron entrevistas en Puerto Leguízamo, Leticia y Puerto Nariño, donde una efectiva recolección de testimonios sobre seguridad fluvial, la cooperación binacional y las estrategias de desarrollo social. Uno de los objetivos importantes del proyecto fue la colaboración entre la academia y la Armada, en donde se prioriza la historia institucional de manera ética y precisa, donde los docentes y estudiantes en conjunto se presentaron como facilitadores entre la comunidad, el territorio y la Armada de Colombia con representación de la base naval de Puerto Leguízamo. De esa manera, se hace énfasis en el uso de herramientas tecnológicas para el desarrollo de narrativas transmedia con la meta de fortalecer la identidad cultural y los hechos históricos vigentes, generando nuevas formas de divulgación que amplíen las posibilidades de acceso y difusión de las experiencias colaborativas.

Palabras clave: Transmedia, Seguridad, Memoria, Amazonas, Trapecio, Audiovisual.

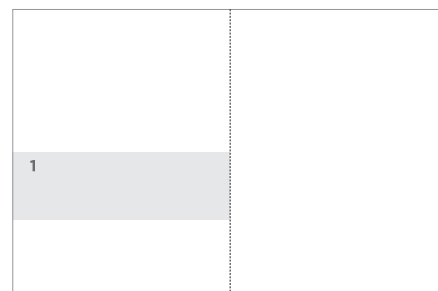
Abstract

The project Currents of Historical Memory: Transmedia Narratives of the Amazon, was developed in collaboration between the University of San Buenaventura and the Colombian National Navy, with the objective of making visible the historical memory of Amazonian communities and the institutional work in the region. Through transmedia tools, five digital products were consolidated: a book, a documentary series, a video game, a virtual reality tour, and an interactive platform. These achieved greater public engagement and generated an assertive response in the dissemination of historical knowledge of the region. During the research sessions, interviews were conducted in Puerto Leguízamo, Leticia, and Puerto Nariño, where testimonies on river safety, binational cooperation, and social development strategies were effectively collected. One of the project's key objectives was collaboration between academia and the Navy, prioritizing institutional history in an ethical and accurate manner. Faculty and students acted as facilitators between the community, the territory, and the Colombian Navy, with representation from the Puerto Leguízamo naval base. In this way, emphasis is placed on the use of technological tools for the development of transmedia narratives with the goal of strengthening cultural identity and current historical events, generating new forms of dissemination that expand the possibilities of access and dissemination of collaborative experiences.

Keywords: Transmedia, Security, Memory, Amazon, Trapeze, Audiovisual.

Introducción

El trapecio amazónico colombiano engloba a los municipios del sur de Tarapacá, Leticia y Puerto Nariño, además de zona no municipalizada; se denomina trapecio porque desde una vista aérea se forma literalmente un trapecio. Gracias a sus riquezas naturales y culturales, se ha convertido en un espacio estratégico importante para varios actores a lo largo de su historia, lo que lo ha transformado en un escenario víctima de la explotación de recursos naturales. Teniendo claro lo anterior, el trapecio amazónico colombiano representa una gran importancia para la Armada Nacional en cuanto a su



<https://www.mexicoambiental.com/amazonas-estuvo-bajo-mar-dos-veces/>

ubicación estratégica y la protección de sus recursos; Además del compromiso de la institución con la comunidad, que resulta invaluable.

El trapecio amazónico colombiano pese a tener una gran cantidad de culturas y tener un gran ecosistema rico en diversidad y naturaleza enfrenta una gran paradoja mientras su memoria histórica es vulnerable al olvido y los esfuerzos para preservarla depende netamente de formatos de medios tradicionales la cual, generan una gran limitación a su difusión y apropiación social. Esta problemática genera un gran desbalance gracias las serias limitaciones de los medios tradicionales de comunicación y su habilidad de transmitir ideas y concepciones de la realidades personales y colectivas de los territorios, dado que la memoria histórica ha sido frecuentemente registrada en documentos escritos o archivos audiovisuales de acceso limitado que se almacena en archivos institucionales, el objetivo de este proyecto colaborativo es ofrecer una alternativa más accesible y participativa, en la que el público no es solo un receptor pasivo, sino un agente activo en la reconstrucción de la historia resaltando las dinámicas sociales, los conflictos y las estrategias de desarrollo en la región amazónica.

Frente a este escenario surge la necesidad de innovar en estrategias que no solo buscan documentar, si no, democratizar la memoria histórica integrando a las comunidades locales, la academia y la Armada Nacional de Colombia en un proceso colaborativo; es aquí donde el proyecto Corrientes de Memoria Histórica: Narrativas Transmedia del Amazonas, busca documentar las memorias del territorio, integrando diversos formatos audiovisuales o reconocido como un proyecto transmedia.

Esta estrategia permite no sólo la preservación de los relatos orales y testimoniales, sino también su acceso y apropiación por parte de distintas audiencias, desde la comunidad académica hasta el público en general. La transmedialidad en este proyecto actúa como un puente entre la tradición y la tecnología, conectando el conocimiento ancestral con herramientas digitales que amplifican su impacto y garantizan su permanencia en el tiempo. Es por ello por lo que la institución requiere la elaboración de referentes históricos integrales desde el punto de vista social, económico, político y militar, bajo dos líneas de acción fundamentales: La afectación a la población civil y la afectación a las tropas de la Armada Nacional (2018).

En el marco de esta investigación, las narrativas transmedia tienen un propósito más profundo y sólido al de ser meramente comunicativo también se configuran como un espacio de encuentro entre la academia, las comunidades y la Armada Nacional. Este espacio reúne diversas voces para construir una memoria más plural, combinando una estética atractiva que invite a nuevos públicos a participar en la creación colectiva de relatos. Como resultado de este proceso, se desarrollaron cinco productos digitales interconectados, Un libro, una serie documental, un videojuego, un recorrido en realidad virtual y una plataforma multimedia interactiva- que conforma una línea narrativa sólida y coherente diseñada para maximizar la difusión de las narrativas construidas y facilitar su apropiación por parte de diferentes audiencias, desde la comunidad académica hasta la población general. Durante el proyecto, se entrevistaron habitantes de Puerto Leguízamo, Leticia y Puerto Nariño, recopilando testimonios sobre temas clave para ambas instituciones como lo son:

Seguridad fluvial, víctimas, cooperación binacional, seguridad integral brindada por la Armada Nacional y proyectos de cooperación interestatal como

Bracolper, y las estrategias de desarrollo social de toda la región Amazónica. Uno de los objetivos clave del proyecto fue fomentar la colaboración entre la academia y la Armada, priorizando la documentación y validación ética de la historia institucional.

A partir de estos relatos, se recopiló información relevante, la cual fue adaptada e integrada en diversos medios digitales con el objetivo de informar a las nuevas generaciones e impulsar la innovación en la región. La página web fue el eje central del proyecto, diseñada para atraer audiencia con accesibilidad e interacción fácil. Allí se recopiló toda la información: relatos de habitantes, costumbres, historia regional y cultura. Y esto genera un fácil acceso de búsqueda para el usuario. Como segundo producto, se desarrolló un recorrido en realidad virtual (VR) que incorporó relatos recopilados durante el trabajo de campo con apoyo de la Armada Nacional. Este buscaba recrear los escenarios con el mayor realismo posible, como por ejemplo la recreación de las embarcaciones utilizadas por la Armada nacional, el AC Reyes, donde muestra, como está creado por dentro.

El VR se desarrolló usando MAYA para modelado 3D (basado en imágenes y grabaciones reales de las embarcaciones) y Unity como motor gráfico. La interacción inmersiva se logró mediante gafas MetaQuest. Uno de los productos más destacados fue la realización de una serie de documentales audiovisuales, el cual logra recopilar información, relatos de las comunidades de la región, hechos históricos de las amazonas en unión a los antecedentes de la armada nacional de Colombia. El producto se construye a partir de una narrativa basada en experiencias personales de los habitantes de la región y del personal de la Armada nacional, con el objetivo de darlos a conocer a lo largo de la serie de documentales. Las entrevistas se realizaron en base de diversas temáticas que son: temáticas abarcan problemáticas de la región como puede ser, el calentamiento global, vecinas, la deforestación, minería ilegal tráfico de animales, derramamiento de petróleo, las cuales, han estado disminuyendo gracias a las soluciones y contribuciones de la Armada Colombiana, donde se encuentra presente en todas las partes de la región.

El producto se compone de 12 documentales con una duración de 6 minutos por vídeo pensado para un público joven por medio de videos cortos mostrando las mejores partes y para el público joven por medio del documental completo. Se desarrolló un videojuego para móvil por medio del motor de Unity, logrando crear un entorno de diferentes puertos de la zona, donde el objetivo del producto es dar a entender las labores que hace las Armada colombiana frente a las diferentes problemáticas de desastre ambiental en los ríos de la región como, por ejemplo, derrame de petróleo. Para la finalización de los productos se desarrolló una interacción con realidad aumentada (AR), este producto fue desarrollado con el propósito dar información sobre el ACR Leticia, donde por medio de códigos QR dispuestos en una base se pueden observar diferentes tipos de interacciones como lo son videos documentales, modelados 3D. Todos estos productos desarrollados están exhibidos donde se alberga toda la información del proyecto para el público que es la página web.

El objetivo es recopilar las diferentes vivencias de los jóvenes investigadores en la construcción del proyecto Corrientes de Memoria Histórica: Narrativas Transmedia del Amazonas, y destacar la importancia de la articulación conjunta entre la Armada Nacional de Colombia y la academia en el desarrollo social del trapecio Amazónico.

El proyecto Narrativas Transmedia del Amazonas: Un proyecto colaborativo entre la Armada Nacional y la Universidad de San Buenaventura, fue una iniciativa desarrollada con el propósito de visibilizar aspectos en torno a la memoria de sus comunidades y la labor que se lleva a cabo en la región Amazónica. A través de un enfoque transmedia, el proyecto busca profundizar en las experiencias inmersivas, las cuales generan nuevas interacciones y apropiaciones por diferentes tipos de público que puedan comprender las dinámicas de labor que son desarrolladas por la Armada Nacional en el territorio.

El presente proyecto destaca el proceso de recolección de la información en los municipios de Puerto Leguizamo, Leticia y Puerto Nariño, en donde se tomaron en cuenta testimonios de algunos líderes comunitarios, habitantes de la región e integrantes de la Armada Nacional con el objetivo de resaltar la incidencia de la institución en múltiples espacios. Además, se contó con el acceso a fuentes documentales y registros institucionales que complementaron la información obtenida en las salidas de campo, el cual, se logró obtener una narrativa que nos habla de temas importantes como la seguridad fluvial, la cooperación binacional, asistencias humanitarias y estrategias de desarrollo social en el territorio.

Las narrativas transmedia representan una estrategia de construcción y difusión de relatos en la que múltiples plataformas y medios de comunicación se entrelazan para ofrecer una experiencia inmersiva e integrada. No se trata únicamente de trasladar una historia de un formato a otro, sino de expandir, permitiendo que cada medio aporte un valor añadido y que la audiencia se involucre activamente en su interpretación y apropiación. En el contexto de la investigación sobre memoria histórica en el Amazonas, el uso de narrativas transmedia cobra especial relevancia, pues facilita la representación de múltiples voces y perspectivas, asegurando que los relatos de las comunidades locales no solo sean documentados, sino también vivenciados de manera interactiva.

Metodología

La metodología que se adopta para la realización del proyecto Navegando Historias: Memoria Amazónica y Narrativas Transmedia desde la Armada, se centra en los pilares principales los cuales son: el enfoque colaborativo y experimental; en donde tiene un papel principal todo el material recolectado en los estudios de campo. Las reflexiones en ese momento se acoplan a una narrativa coherente, con los resultados obtenidos de los productos. Además, se identifica una dimensión de las expectativas generadas por todo el equipo de investigadores; la Armada Nacional y las comunidades amazónicas de Puerto Leguizamo.

La base metodológica se centra en las experiencias recolectadas durante todas las jornadas de campo, de las cuales se lograron recolectar alrededor de 43 entrevistas en las que se destacan personal de la Armada Nacional, líderes de la comunidad, autoridades locales y representantes de comunidades indígenas Ticuna y Ticoya. De la misma forma, la recolección de los testimonios permitió un análisis temático de los mismos y una categorización como: Seguridad fluvial, salud integral, esfuerzos no armados, atención a víctimas y cooperación Binacional, cada una refleja la presencia de la institución, y las dinámicas territoriales, con el propósito de comprender los testimonios recolectados.

El desarrollo colaborativo pretende un ejercicio dialógico; los investigadores participaron en mesas de trabajo interdisciplinarias, estas reuniones no solo plantearon la organización de la información sino también para discutir las tensiones y los puntos de convergencia entre las percepciones comunitarias y las intervenciones institucionales, estas sesiones ayudaron a que no solo fuera un informe de hallazgos, sino que por otra parte ayudó a establecer una representación vivencial de la interacción entre actores.

Una de las implementaciones más importantes como método fue la incorporación de herramientas digitales que permiten que fuera desarrollada de manera más eficaz, y fue por medio de herramientas transmedia que se obtuvieron fragmentos de audio y video con ayuda de imágenes y cartografía social; La realización de la presentación permitió mostrar datos, emociones y contextos. Con el objetivo de mostrar a la audiencia el territorio amazónico de una forma más cultural, sus experiencias sociales y la gran cantidad de voces que lo habitan. Su narrativa fue desarrollada por medio de temáticas seleccionadas, donde cada relato y testimonio iba acompañado de contenido audiovisual para facilitar la comunicación de las memorias de una sociedad cultural única.

Por ello, la metodología no solo se basa en una organización documental, al contrario, fue un proceso de comunicación y observación. La participación de estudiantes investigadores de un proceso de diálogo entre academia, instituciones y la comunidad, logrando obtener un mejor desarrollo en el proyecto. Finalmente, es importante destacar que el desarrollo de este proyecto no se considera una conclusión, sino una demostración del proceso, los retos y las oportunidades surgidas de la articulación entre la academia y las instituciones como la Armada Nacional. El propósito de este trabajo es fomentar el desarrollo social de las comunidades que habitan el trapecio amazónico, demostrando cómo la colaboración interinstitucional puede ser clave para la transformación social en la región.

Memoria histórica: Apoya la reconstrucción y representación de la memoria histórica del conflicto armado, promoviendo la participación de las víctimas y sirviendo como plataforma para la articulación de estas memorias. (Armada de Colombia, S, F, 2025).

Narrativa Transmedia: Estrategia que usa diferentes medios y plataformas para contar una historia de forma interconectada, enriqueciendo la narrativa y logrando la participación activa e inmersiva del público.

Región del Amazonas: El Amazonas es uno de los bosques selváticos más grandes del mundo, vital para la regulación del carbono y el cambio climático. Afectado por la colonización y deforestación, sufre conflictos territoriales complejos debido a la explotación de recursos, lo que tensa las relaciones entre comunidades y agrava la lucha por derechos territoriales, complicando su protección. Según Acosta (2015), estas alteraciones amenazan su estabilidad y la crisis ambiental global.

Resultados

Con base en lo anterior, podemos resaltar los siguientes resultados: el desarrollo de los productos transmedia permiten tener una gran interacción y participación del público en la historia, logrando generar una emoción e interés por la memoria histórica. Dentro de la creación de contenido se integró las comunidades y su cultura, el cual, esto generó una representación más

única de sus tradiciones y experiencias. Las herramientas tecnológicas son importantes para guardar y revivir los hechos históricos, porque a través de los productos transmedia se evidencia los hechos vividos a lo largo de los años. la tecnología transmedia puede ser una oportunidad de innovar y mantener vigente la historia cultural por muchas generaciones.

Algo importante que destacar en la creación de los productos transmedia fue el gran papel que este tuvo como método de enseñanza de la memoria histórica, ya que, presentar la historia de la armada nacional y la cultura, experiencia y costumbres de las comunidades del Amazonas, genera una atracción al público y así aumentando una culturización y permitir la transmisión de los hechos históricos a las futuras generaciones. Los contenidos transmedia permiten fortalecer tanto la identidad cultural de un lugar tan importante como lo es las amazonas y sus comunidades, como la identidad y presencia de la armada nacional.

Bajo otro punto de vista nos encontramos con la experiencia del investigador Juan José Ardila, en donde enfatiza puntos clave sobre el trabajo de campo, donde este permite generar una constante interacción y vínculo con las comunidades, ya que, las historias cobran un protagonismo por el hecho de ser contadas de primera mano de una forma más emocional y significativa, en lugar de solo ser reportadas por medios tradicionales. En donde otro fundamento clave es el relato de la Capitán de Corbeta María Antonia Alfonso Mujica menciona que durante el trabajo de campo se enfrentaron a numerosos retos y oportunidades entre la Armada y la academia. Antes de iniciar el proyecto se enfrentaron a diversas preparaciones previas como seminarios y simposios para preparar a todos los equipos en el planteamiento de los roles, así logrando un trabajo grupal de comunicación efectiva y trabajar de manera coordinada; Asegurando que el margen de error fuera mínimo.

Del mismo modo, habla del enfoque de oportunidades, el cual, hay que resaltar, la cooperación como un aprendizaje eficaz, esto hablando de las diferencias que hay entre la parte académica y los operativos de la Armada Nacional, logrando encontrar un equilibrio, la cual fue pieza clave para colaborar por un objetivo en común. En una de las entrevista el director del proyecto, hace énfasis a la gran aportación que hizo la academia a la memoria institucional de la Armada en varios instantes, en donde se puede destacar la gran importancia de la articulación entre la Armada y la universidad, en donde se resalta que el personal de la Armada que trabajó con ellos fue reconocido como profesores, y esto ayudo a que el entorno de trabajo fuera más ameno y se lograra la facilidad de interactuar con las comunidades locales.

También hace referencia a la activa colaboración de la armada, el cual, permitió abordar temas complejos y documentar la historia de la región de manera ética, lo que ayudo a que el contenido dirigido, por ejemplo, para el documental, sea más valioso como memoria histórica y así generar más atención del público hacia el producto. Además, mencionan que la Universidad tiene algunos principios que aporta a esa gran conexión con las necesidades sociales de las comunidades lo cual genera un refuerzo en el papel de la academia en la construcción de memoria institucional.

Conclusiones

Navegando Historias: Memoria Amazónica y Narrativas Transmedia desde la Armada y la Academia fue un proyecto en el cual se realizó un desarrollo y la búsqueda de conocimiento a través de las herramientas transmedia como

lo son el libro, producto documental, página web, VR, AR, juego, logrando crear historias, emociones y narrativas claras y concisas por medio de productos interactivos e innovadores que generan conexiones y emociones con la historia.

Este proyecto demostró que la articulación dentro la Armada Nacional y la academia genera un nuevo modelo innovador para el desarrollo social en el trapecio amazónico donde la institución facilitó el acceso a territorios y a testimonios, mientras la academia aportó metodologías participativas y tecnologías transmedia, superando los formatos tradicionales y reduciendo tensiones históricas gracias al trabajo interdisciplinario que se realizó con las comunidades de la región.

El proyecto tuvo un impacto significativo en la sociedad al contribuir con la preservación de los hechos históricos de una región tan importantes como lo es el Amazonas. La memoria histórica de su gente y sus costumbres quedaron inmortalizados en un medio digital que perdurara en el tiempo, Asimismo, destaca el papel de la Armada Nacional en la protección y preservación de la región, relatando vivencias y desafíos enfrentados por su personal ante los distintos problemas del territorio. Este impacto se reflejará en el aprendizaje de niños, jóvenes y adultos interesados en conocer la historia del Amazonas y porque es considerado el pulmón del mundo.

Los contenidos transmedia generados permiten preservar y fortalecer la identidad cultural de un lugar tan significativo para Colombia y el mundo como lo es el Amazonas y sus comunidades. En todo el trayecto del proyecto, los investigadores y el personal activo de la Armada Nacional trabajaron en conjunto para superar y aprender de las oportunidades que se les iban presentando.

La carrera de ingeniería multimedia para la fácil adaptación y desarrollo productivo en la creación de los contenidos audiovisuales, y cómo se generó una compatibilidad entre la academia y la armada nacional. Muchos proyectos creados no hubieran sido posible sin un conocimiento previo en distintas herramientas de trabajo audiovisual, edición, programación, como lo son Photoshop, Adobe Premier, Unity, Maya 3D etcétera.

Referencias

- Valverde Ayala, R. D., Guevara Burgos, J. I., García Suárez, A. E., & Proaño Cobos, M. L. (2024). *La importancia de la memoria histórica en la construcción de la identidad cultural a través de recursos digitales*. *South Florida Journal of Development*, 5(7), 1-23. <https://doi.org/10.46932/sfjd5n7-024>
- Chamorro Maldonado, M. (2024). *Visión de las narrativas transmedia de la memoria. Estudio de caso plataforma digital Museo de la Memoria y Derechos Humanos de Chile*. *European Public & Social Innovation Review*, 9, 1-25. <https://doi.org/10.31637/epsir-2024-297>
- Gaete Quezada, R. (2021). Evaluación de resultados de aprendizaje mediante organizadores gráficos y narrativas transmedia. *Revista de Estudios y Experiencias en Educación (REXE)*, 20(44), 384-407. <https://doi.org/10.21703/0718-5162.v20.n44.2021.022>
- Pinto Arboleda, M. C., Zapata Cárdenas, M. I., & Gómez Vallejo, L. E. (2022). Narrativa transmedia: una mirada al conflicto armado y la memoria social indígena desde los relatos expandidos. Casos: Colombia y Perú. *Contratexto*, (37), 259-286. <https://doi.org/10.26439/contratexto2022.n037.5263>
- Zarama Parra, T. A. (2017). *La narrativa transmedia: una herramienta digital con impacto cultural* (Informe auxiliar de investigación, Universidad Cooperativa de Colombia, Programa de Comunicación Social). Universidad Cooperativa de Colombia. Recuperado de <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/558c25d1-3e6f-40ff-8568-5afb71a2936f/content>
- De la Fuente Prieto, J., Lacasa Díaz, P., & Martínez-Borda, R. (2019). Adolescentes, redes sociales y universos transmedia: la alfabetización mediática en contextos participativos. *Revista Latina de Comunicación Social*, 74, 172-196. <https://doi.org/10.4185/RLCS-2019-1326>
- Guio Rodríguez, C. A., & Rojas Suárez, A. (2019). *Amazonia colombiana: dinámicas territoriales*. En *Ideas Verdes*, (22), 1-48. Fundación Heinrich Böll - Oficina Bogotá - Colombia. Recuperado de <https://co.boell.org>
- Chindoy Luna, L. Y., & Cerri, R. (2021). *Informe de análisis de situación de salud de pueblos indígenas con base territorial y transfronterizo Perú-Colombia-Brasil: Producto 4 - Resumen ejecutivo*. Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA), Organización Panamericana de la Salud (OPS), Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Recuperado de <https://acervo.socioambiental.org/sites/default/files/documents/f2100005.pdf>
- Fernández Gallego, M. del P., & Sánchez Muñoz, C. (2024). Historia y memoria en el mundo digital: tratamiento y plataformas digitales. *Historia Actual Online*, 65(3), 185-200. <https://doi.org/10.36132/vx5d7j86>
- Bolognesi, M. L. (2023). Post pandemia y nuevos hábitos de consumo de productos audiovisuales: streaming, narrativas transmedia y experiencias personalizadas. *Millcayac, Revista Digital de Ciencias Sociales*, 10(18), 1-24. Universidad Nacional de Cuyo. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=525874126005>
- Arias-Peñaranda, C. A. (2023). *Análisis de la experiencia documental transmedia para la apropiación del patrimonio cultural en Colombia 2012-2019*. *Revista de la Academia*, (36), 22-36. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9557355.pdf>
- García Carrizo, J., & Heredero Díaz, O. (2015). Propuesta de un modelo genérico de análisis de la estructura de las narrativas transmedia. *Icono*, 14, 13(2), 260-285. <https://doi.org/10.7195/ri14.v13i2.745>
- Rampazzo Gambarato, R. (s.f.). *Diseño de un proyecto transmedia: consideraciones teóricas y analíticas* (Alma Lucía Leoz, Trad.). Cátedra de Comunicación Transmedia, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Buenos Aires. Recuperado de <https://www.fsoc.uba.ar>
- Rojas Cervantes, D. E. (2018). *Diseño de productos transmedia. Estrategia para la expansión de contenidos audiovisuales*. En *Diseño y Creación. Foro Académico Internacional, 17 Festival Internacional de la Imagen* (pp. 420-426). Universidad de Caldas. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/336812720_diseño_de_productos_transmedia
- León Bueno, P. A., & Nieto Fernández, L. C. (2020). *Análisis de la vocación de Leticia-Amazonas en el marco de los eventos sociales mediante el aprovechamiento de la riqueza natural y cultural del destino* (Trabajo de grado, Universidad Externado de Colombia). Universidad Externado de Colombia. Recuperado de <https://bdigital.uexternado.edu.co/handle/O01/3037>
- Guerrero Acero, M. (2019). *Construcción de la memoria histórica en el municipio de Venecia, Cundinamarca: Un ejercicio para promover el empoderamiento de los jóvenes como sujetos políticos* [Tesis de maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/22556>
- Puig Borràs, N. (2013). Las narrativas transmedia y la construcción de universos mediáticos. *Communication Papers - Media Literacy & Gender Studies*, 2(3), 83-85. Universitat de Girona. Recuperado de <http://www.communicationpapers.es>
- Zapata Villa, Y. C. (2019). *La narrativa transmedia: una estrategia para el fortalecimiento de la comprensión lectora* (Trabajo de grado, Especialización en Pedagogía). Universidad Pedagógica Nacional. Recuperado de <https://repository.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/10863>
- Memoria Histórica y Contexto. (s/f). Mil.co. Recuperado el 1 de marzo de 2025, de <https://www.armada.mil.co/es/memoria-historica-y-contexto>
- Domingo Sánchez, Mesa Martínez (2018) *Narrativas transmediales: Nuevos modos de ficción audiovisual, comunicación periodística y performance en la era digital* <https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/89092/%5b2019%5d%20No%20piedras%20la%20memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Fotografías

<https://www.mexicoambiental.com/amazonas-estuvo-bajo-mar-dos-veces/>

La Calidad Objetiva del Queso Oaxaca para la Revalorización de la Producción Artesanal

Cristina Salas-Vargas ^{1,2,*}, Randy Alexis Jiménez-Jiménez ^{2*}, Mauricio Miguel-Estrada ², Valentín Efrén Espinosa-Ortiz ²



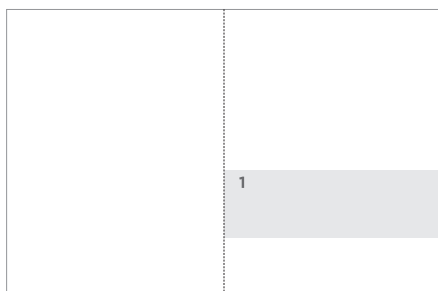
Acerca de los autores

¹ Universidad Politécnica de Atlacomulco, Atlacomulco de Fabela, Estado de México, México.

² Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Ciudad Universitaria, Ciudad de México.

Resumen

Se aplicó la metodología de Investigación Acción Participativa (IAP) en queserías artesanales de Aculco, Estado de México, para comparar quesos tradicionales y ultraprocesados. Se analizaron seis muestras de queso Oaxaca (tres artesanales y tres comerciales) en octubre de 2023, evaluando humedad, proteína y grasa según AOAC (2015) y NOM-155-



<https://mextrotter.com/es/Lexikon/queso-oaxaca/>

SCFI-2012. Los quesos artesanales presentaron mayor proteína (21.7% vs 17.14%) y grasa (25.4% vs 21.2%) que los industriales, lo que evidencia su superior calidad nutricional. Estos resultados respaldan la diferenciación legal de los quesos tradicionales, impulsan su integración en sistemas normativos y promueven la trazabilidad, la mejora de procesos y la identidad alimentaria con beneficios para la salud.

Palabras clave: Queserías artesanales, normas de calidad, proteína, sostenibilidad.

Abstract

The Participatory Action Research (PAR) methodology was applied in artisanal cheese factories in Aculco, State of Mexico, to compare traditional and ultra-processed cheeses. Six samples of Oaxaca cheese (three artisanal and three commercial) were analyzed in October 2023, evaluating moisture, protein, and fat according to AOAC (2015) and NOM-155-SCFI-2012. Artisanal cheeses had higher protein (21.7% vs 17.14%) and fat (25.4% vs 21.2%) than industrial cheeses, which shows their superior nutritional quality. These results support the legal differentiation of traditional cheeses, promote their integration into regulatory systems and promote traceability, process improvement and food identity with health benefits.

Keywords: Artisan cheese factories, quality standards, protein, sustainability.

Introducción

Los sistemas de gestión de calidad, como las normas ISO 9001, 14001, 45001 y 50001, proporcionan un marco para la mejora continua, el cumplimiento de estándares internacionales y la satisfacción del cliente, fortaleciendo la competitividad, la eficiencia y la sostenibilidad empresarial (Flores, 2023).

En el sector agropecuario, la variabilidad climática, el mercado y la gestión de recursos dificultan la toma de decisiones; por ello, las normas de calidad y gestión son herramientas clave para una gestión más informada, eficaz y sostenible. (Rojas, 2016).

Así, en los años 90's se generaron cambios en la producción agropecuaria en México, impulsando la producción y consumo de alimentos de forma masiva (Ibarra, 2016), adoptando una cultura alimenticia basada en productos ultraprocesados (Elizabeth, Machado, Zinöcker, Baker, & Lawrence, 2020; Rendón-Rendón et al., 2019), por lo tanto, se crearon normas mexicanas inclinadas a la regulación de productos alimenticios, sin tomar en cuenta la naturalidad de la materia prima por conservadores y aditivos, siendo que muchas de esas normas fueron copiadas de países con otra cultura gastronómica. La industria láctea presenta estas situaciones, ocasionando el aumento de quesos imitación, los cuáles sustituyen total o parcialmente la leche natural por productos industriales, conteniendo limitada o nula fuente de grasas y proteínas de origen animal (Miguel, Álvarez-Teno, Iriando de Hond, & Mancho, 2015; Villegas de Gante & Huerta Benítez, 2015), y presentando alto contenido de calorías sintéticas (Jiménez-Jiménez, Rendón-Rendón, Miguel-Estrada, 2024).

El consumo de quesos ultraprocesados aumenta el riesgo de enfermedades crónico-degenerativas como diabetes, hipertensión, colesterol elevado, triglicéridos, sobrepeso y obesidad (Zhang et al., 2022; Marrón-Ponce et al.,

2019), situación crítica en México, donde casi la mitad de la población tiene sobrepeso (Ibarra, 2016) y 36.9 % obesidad (Carillo et al., 2017; Sanchez y Caballero, 2025), y se pierde la tradición de producir alimentos artesanales (Ayala y García, 2025).

La calidad del queso depende de sus propiedades fisicoquímicas, sabor, textura, apariencia, inocuidad y valor nutricional (Fox et al., 2017; El-Sayed et al., 2025). Normativas mexicanas definen el queso por su elaboración a partir de cuajada de leche estandarizada y pasteurizada, con adición opcional de crema, fermentos, sales fundentes e ingredientes, pudiendo ser fresco, madurado o procesado (NOM-243-SSA-2010 SS, 2010). Para el queso Oaxaca se establece mínimo 21.5 % de proteína, 20 % de grasa y máximo 51 % de humedad (NMX-F-733-COFOCALEC-2013), lo que permite a la industria adicionar proteínas o grasas vegetales sin afectar la norma (Adolph, 2018; Comisión del Codex Alimentarius, 2007).

Estudios internacionales muestran barreras para queserías artesanales, como limitaciones financieras y dificultades para cumplir normativas (Ghadge et al., 2021; Holmann, 2001; Le et al., 2014; Puerto et al., 2003), así como falta de investigación y competencia con productos de imitación (Rendón-Rendón & Jiménez-Jiménez, 2024). Desde 2019, la búsqueda de autosuficiencia y soberanía alimentaria ha impulsado la mejora de procesos productivos artesanales en México (Sheinbaum, 2024).

Este trabajo analiza nutricionalmente quesos tradicionales y ultraprocesados para visibilizar la calidad de los quesos artesanales y su aporte a la soberanía alimentaria, enfocándose en la agroindustria rural mexicana, compuesta por empresas familiares, artesanales y semi-tecnificadas, con potencial para mejorar gestión de recursos, procesos, capital humano e identidad de calidad (Espinosa Ayala et al., 2013; Pérez Pérez et al., 2024).

1 Procedimientos experimentales

La metodología se basó en un estudio comparativo de seis muestras de queso Oaxaca, diferenciadas en quesos tradicionales (solo leche de vaca) y quesos comerciales (con ingredientes adicionales como aditivos o féculas), cuyo esquema se muestra en la Figura 1. El objetivo fue comparar la composición nutricional -humedad, proteína cruda y grasa cruda- de los distintos tipos de queso.

Las muestras, adquiridas en queserías locales durante el otoño de 2023, fueron refrigeradas a 4 °C y llevadas el mismo día al Laboratorio de Nutrición Animal y Bioquímica de la FMVZ-UNAM. Los análisis se realizaron siguiendo los métodos oficiales de AOAC (2015), armonizados con ISO, FIL, IUPAC y Codex Alimentarius, y conforme a la NOM-155-SCFI-2012 (DOF, 2011, 2021), garantizando resultados válidos y comparables con estándares nacionales e internacionales. Este estudio forma parte de un proyecto más amplio orientado a evaluar diferencias de calidad de quesos en distintos periodos y territorios del centro-occidente de México.

2 Resultados

Los resultados indican que, los quesos elaborados sólo con leche de vaca tienen un promedio mayor en todos los aspectos estudiados, excepto en humedad (Tabla 1). Así, en relación con esta característica, los quesos

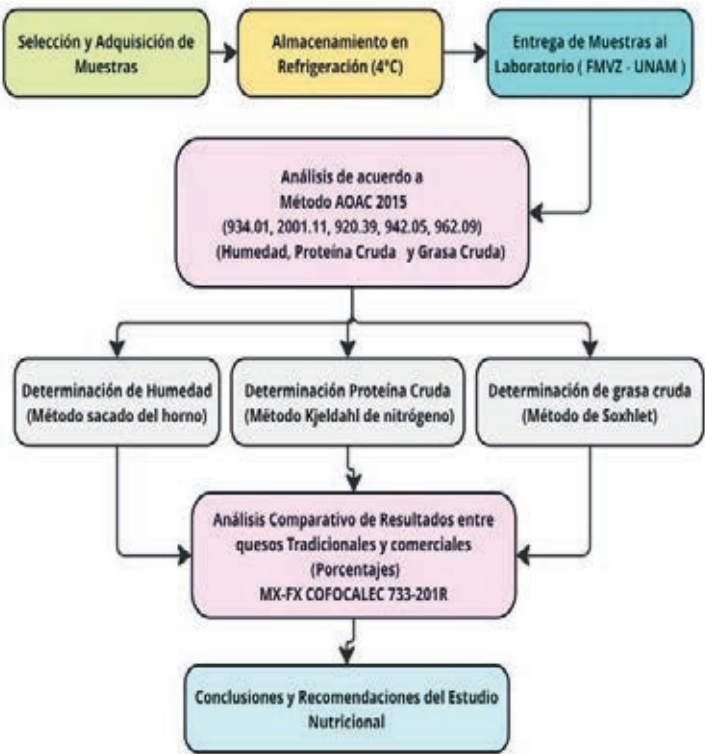


Figura 1

Proceso metodológico del estudio propuesto. Elaboración propia.

comerciales presentaron mayor porcentaje de humedad comparados con los quesos artesanales (49.5 VS 45.6 %). Sin embargo, en relación con la proteína y la grasa, los quesos artesanales tuvieron mayor porcentaje de estos componentes cuando se comparan con los quesos comerciales (21.7 VS 17.14 y 25.4 VS 21.2 %, respectivamente), como puede verse en la gráfica comparativa de la Figura 2. El hecho de que el estudio siga las recomendaciones de la norma también asegura que los métodos sean apropiados y reconocidos por las autoridades mexicanas para el análisis de alimentos.

TABLA 1.
INDICADORES DE ELABORACIÓN DE QUESOS SOLO CON LECHE DE VACA.

Tipo de Queso	Humedad (%)	PC (%)	Grasa Cruda (%)
Tradicionales	45.5	21.7	25.4
Comerciales	49.5	17.1	21.4
Norma 733 -COFOCALEC-2013	51 máx.	21 mín.	20 mín.

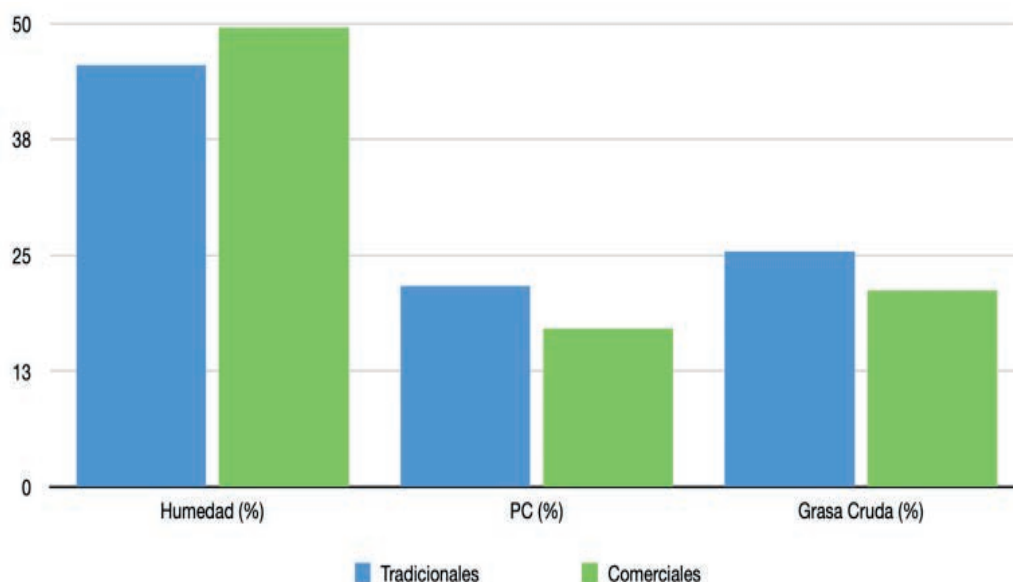


Figura 2

Gráfica comparativa con respecto a la elaboración de quesos solo con leche de vaca. Elaboración propia.

El contenido de humedad es uno de los parámetros clave en los productos lácteos, ya que influye directamente en la textura, el sabor y la conservación del queso. El contenido de humedad generalmente se determina mediante el método de secado en horno. Este proceso consiste en pesar una muestra del queso, luego se coloca en un horno a una temperatura constante (generalmente a 105 °C) durante un tiempo determinado hasta que toda el agua se evapora. La diferencia de peso antes y después del secado indica el porcentaje de humedad en la muestra.

La proteína cruda se determina mediante el método de Kjeldahl, que mide el contenido total de nitrógeno en la muestra. Dado que las proteínas contienen nitrógeno, se puede calcular la cantidad de proteína cruda multiplicando el nitrógeno total por un factor de conversión (generalmente 6.38 para los productos lácteos). Este análisis se realiza a través de una serie de pasos químicos que incluyen la digestión de la muestra con ácido y la posterior destilación del nitrógeno.

La grasa cruda se determina utilizando el método de extracción por Soxhlet, un procedimiento en el que la muestra se somete a un disolvente (generalmente éter de petróleo o hexano) que disuelve las grasas. El disolvente se evapora, dejando solo la grasa que se pesará para determinar el porcentaje de grasa en la muestra.

3 Discusión

El queso Oaxaca natural presentó mayor contenido de proteína que los quesos comerciales y cumple con la normativa mexicana, demostrando que las agroindustrias familiares pueden producir lácteos tradicionales de calidad y valor nutricional conforme a la Norma MX-F-733-COFOCALEC-2013.

De acuerdo con Jiménez- Jiménez et al., (2024), el consumo de ultraprocesados afecta la salud, por lo que se busca impulsar la producción de quesos naturales. Estudios de PROFECO muestran que sólo 12 de 30 marcas de queso Oaxaca cumplen con las normas nutrimentales, evidenciando que al campo mexicano se le exige mayor calidad, mientras que muchos productos industrializados ingresan al mercado sin cuestionar su valor nutricional Grenoville, Le Gall, & Noel, 2021).

Las diferencias entre quesos naturales y comerciales se deben a ingredientes no naturales usados en los industriales, que abaratan costos pero reducen su calidad nutricional. Por lo anterior, los quesos tradicionales no pueden competir en precio de venta con quesos comerciales, siendo que, para elaborar un kg de queso natural de vaca, se requieren en promedio 10 lt de leche fluida y, en el mercado local, el promedio del pago al productor de leche está en \$10, lo que generaría un costo de \$100 por kg de queso al considerar solo la leche; por su parte, en el caso de los quesos comerciales, estos se venden hasta en \$60 por kg, lo que indica que la cantidad de leche que emplean en su elaboración es mínima.

Así, el consumidor mexicano es engañado al creer que está consumiendo un queso tradicional local, elaborado en su totalidad con leche de vaca a un menor precio; sin embargo, esta compra puede generar un ahorro en el concepto de alimentación, pero a largo plazo, puede ser contraproducente debido al consumo de productos industrializados como las harinas, extensores o leche en polvo, los cuales son importados en su mayoría. Así mismo, se han construido percepciones cualitativas sobre lo que es un buen queso, porque se adjudica al color (muy blanco principalmente), al empaque, etiqueta, entre otros, lo cual en la mayoría de los casos es indicativo de queso ultraprocesado de imitación (Rendón y Jiménez, 2024), seguir consumiendo sin conocimiento puede ser un factor de riesgo para adquirir una enfermedad crónico-degenerativa.

Es importante señalar que países con tradición quesera de quesos con elaboración de leche no pasteurizada han gestionado la modificación de normativas para dar paso a estos productos. Algunos de hecho pertenecen a los quesos con denominación de origen protegido o Indicación geográfica protegida, estos cambios basándose en estudios con el análisis fisicoquímico de los quesos lo que da pauta a una norma verificada, y desarrollada desde el producto en su territorio (Europea, 2014)

Es conocido que en las últimas décadas en la población mexicana se ha incrementado la presencia de enfermedades crónico degenerativas como el sobrepeso, la obesidad, la diabetes, la hipertensión arterial, entre otras; el 80 % de estas enfermedades son atribuidas al tipo de alimentos que cotidianamente tenemos al alcance, muchos de estos son ultraprocesados, es decir, formulaciones industriales a base de sustancias derivadas de alimentos, con aditivos que dan color, sabor o textura para intentar imitar a los alimentos, por lo que son bajos en nutrientes, hipercalóricos, altos en azúcares, sodio, grasa y carbohidratos (Jiménez-Jiménez, Rendón-Rendón y Miguel-Estrada, 2024).

Por tal motivo es relevante, a partir de los resultados objetivos, con evidencia científica, se desarrollen e impulsen estrategias para divulgar y reflexionar tales resultados con el fin de revalorar y reconceptualizar los quesos tradicionales y dar pauta a una calidad de los quesos artesanales tradicionales mexicanos.

Conclusiones

La evidencia científica confirma que los quesos naturales tradicionales tienen mayor valor nutricional que los ultraprocesados, lo que fortalece a las agroindustrias familiares. Esto coincide con la Ley General de Alimentación Adecuada y Sostenible (2024), que impulsa una dieta nutritiva y local e impulsar la producción de quesos naturales y su consume será clave para la industria quesera. Se requiere seguir caracterizando la calidad y desarrollar manuales de procedimientos para integrar estos productos a las normativas alimentarias.

Financiamiento

Este proyecto fue apoyado por Proyecto 321289 *“Desarrollo de estrategias participativas para el Fortalecimiento de redes de producción y consumo de productos lácteos tradicionales orientadas a la soberanía alimentaria de territorios del centro-occidente de México”*; financiado por PRONAI - CONAHCYT.

Referencias

- Valverde Ayala, R. D., Guevara Burgos, Adolph, R. (2018). Reseña de las normas NMX voluntarias del queso en México y normas correspondientes del Codex. *U.S. Dairy Export Council*, pp. 1-23.
- Ayala Carrillo, María del Rosario; García Zúñiga, Sabina Victoria (2025). Prácticas alimentarias tradicionales indígenas: resistencias y luchas ante los imperios alimentarios. *Vínculos. Sociología, análisis y opinión*. Año 6, Núm. 11. DOI: <https://doi.org/10.32870/vsao.v6i11.7725>
- Carrillo Ramírez, J., Algarín Rojas, L., Camacho Romero, O., & Reynoso, J. (2017). Análisis situacional de la prevalencia e incidencia de la obesidad en Latinoamérica: caso México y Colombia. *Educación Y Salud. Boletín Científico Instituto De Ciencias De La Salud, Universidad Autónoma Del Estado De Hidalgo*, 6(11). <https://doi.org/10.29057/icsa.v6i11.2691>
- Comisión del Codex Alimentarius. (2007). Alimentos producidos orgánicamente. In O. OMS, FAO (Ed.), *Codex alimentarius* (Tercera ed, Vol. 2). Retrieved from <http://www.fao.org/3/a1385s/a1385s00.pdf>
- DOF. (2011). Norma Oficial Mexicana 155-SCFI-2010. *Diario Oficial*.
- DOF. (2021). *PROY-NMX-733-COFOCALEF-2021*. Retrieved from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5629565&fecha=13/09/2021&print=true
- Elizabeth, L., Machado, P., Zinöcker, M., Baker, P., & Lawrence, M. (2020). Ultra-processed foods and health outcomes: A narrative review. *Nutrients*, 12(7), 1-36. <https://doi.org/10.3390/nu12071955>
- El-Sayed, S.M., Kholif, A.M.M., El-Sayed, H.S. et al. Augmenting the Quality and Shelf Life of Ras Cheese by Adding Microencapsulated Allspice Berry Extract Nanoemulsion. *Food Bioprocess Technol* 18, 588-604 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03473-2>
- Espinosa Ayala, E., Arriaga Jordán, C., Boucher, F., & Espinoza Ortega, A. (2013). Generación de valor en un Sistema Agroalimentario Localizado (SIAL) productor de quesos tradicionales en el centro de México. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 112(3), 36-44.
- Europea, D. U. (2014). *Solicitud de aprobación de una modificación que no se considere menor del pliego de condiciones de una Denominación de origen protegida o una Indicación Geográfica Protegida*.
- Fox, P. F., & Cogan, T. M. (2004). Factors that Affect the Quality of Cheese. *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology*, 1(C), 583-608. [https://doi.org/10.1016/S1874-558X\(04\)80084-8](https://doi.org/10.1016/S1874-558X(04)80084-8)
- Fox, Patrick F; Cogan, Timothy M; Guinee, Timothy P. Chapter 25 - Factors That Affect the Quality of Cheese, Editor(s): Paul L.H. McSweeney, Patrick F. Fox, Paul D. Cotter, David W. Everett, Cheese (Fourth Edition), Academic Press, 2017, Pages 617-641, ISBN 9780124170124, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417012-4.00025-9>.
- Ghadge, A., Er Kara, M., Mogale, D. G., Choudhary, S., & Dani, S. (2021). Sustainability implementation challenges in food supply chains: a case of UK artisan cheese producers. *Production Planning and Control*, 32(14), 1191-1206. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1796140>
- Grenoville, S., Le Gall, J., & Noel, J. (2021). *Distribución, comercialización y acceso a alimentos de calidad en América Latina*.
- Holmann, F. (2001). Milk market of small scale artisan cheese factories in selected livestock watersheds of Honduras and Nicaragua. *Livestock Research for Rural Development*, 13(1). Retrieved from <http://www.lrrd.org/lrrd13/1/holm131.htm>
- Ibarra, L. S., (2016). Review: Transición Alimentaria en México. *Razón y Palabra*, 20(94),162-179. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=199547464012>
- Jiménez-Jiménez, R. A., Rendón-Rendón, M. C., & Miguel-Estrada, M. (2024, January). ¿Qué es eso que comemos? La calidad nutricional de los quesos tradicionales. *La Jornada Del Campo*, 15. Retrieved from <https://www.jornada.com.mx/2024/01/20/delcampo/index.html>
- Joaquín A. Marrón-Ponce, Mario Flores, Gustavo Cediell, Carlos Augusto Monteiro, Carolina Batís. Associations between Consumption of Ultra-Processed Foods and Intake of Nutrients Related to Chronic Non-Communicable Diseases in Mexico. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, Volume 119, Issue 11,2019, Pages 1852-1865, ISSN 2212-2672, <https://doi.org/10.1016/j.jand.2019.04.020>.
- Le, S., Bazger, W., Hill, A. R., & Wilcock, A. (2014). Awareness and perceptions of food safety of artisan cheese makers in Southwestern Ontario: A qualitative study. *Food Control*, 41(1), 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.01.007>
- Miguel, E., Álvarez-Teno, A., Iriondo de Hond, M., & Mancho, C. (2015). Sensory characterization of cheese from Madrid. Differences in sensorial perception and usefulness of sensory analysis to study cheese texture properties. *XVI Jornadas Sobre Producción Animal*.
- NMX. (1976). *NMX-F-098-1976. Determinación de proteínas en quesos*. México: Dirección general de normas.
- Pérez Pérez, L., Pérez Padilla, M. F., Pérez Lara, A. P., Pérez Osornio, S., & Pérez Osornio, E. (2024). La soberanía alimentaria desde la producción de lácteos. *Voces de Aculco, Estado de México. La Jornada del Campo*, p. 10.
- Puerto, P. P., Baquero, M. R. F., Romero, C. D., & Martín, J. D. (2003). Caracterización Físico-Química De Quesos Frescos Elaborados Con Leche De Cabra En La Isla De Tenerife Physicochemical Characterization of Fresh Cheeses Elaborated With Goat Milk in the Island of Tenerife Caracterización Físico-Química De Queixos Frescos E. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 4(2), 103-108. <https://doi.org/10.1080/11358120309487750>
- Rendón-Rendón, M. C., & Jiménez-Jiménez, R. A. (2024, Enero 20). Los quesos que consumimos. *La Jornada Del Campo*, p. 14.
- Rendón-Rendón, M. C., Núñez Espinoza, J. F., Soriano-Robles, R., Espinosa Ortiz, V. E., Chávez Pérez, L. M., & Jiménez-Jiménez, R. A. (2019). The Social Fabric of Cheese Agroindustry: Cooperation and Competition Aspects. *Sustainability*, 11(10), 2921. <https://doi.org/10.3390/sul1102921>
- Sánchez Ramírez, J. E., & Caballero López, F. E. (2025). Relación entre el Gasto Público en Deporte y la Tasa de Obesidad en México: Un Análisis de 2000 a 2022. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(1), 2632-2645. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16032
- Sheinbaum, C. (2024). *Soberanía Alimentaria*. Retrieved from <https://www.cmdrs.gob.mx/sites/default/files/cmdrs/sesion/2024/07/04/6220/generales/2-soberania-alimentaria.pdf>
- SS. (2010). NOM-243-SSA1-2010. *Diario Oficial*, pp. 1-128. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2018.09.003> <https://cjaduanero.com/cjablog/wp-content/uploads/2019/07/Hexametfosfato.pdf> <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2020.05.051>

Villegas de Gante, A., & Huerta Benítez, R. (2015). Naturaleza, evolución, contrastes e implicaciones de las imitaciones de quesos mexicanos genuinos. *Estudios Sociales: Revista de Investigación Científica*, 23(45), 214-236.

Zefeng Zhang, Sandra L. Jackson, Euridice Martinez. Relationship Between Ultraprocessed Food Intake and Cardiovascular Health Among U.S. Adolescents: Results From the National Health and Nutrition Examination Survey 2007-2018, *Journal of Adolescent Health*, Volume 70, Issue 2, 2022, Pages 249-257, ISSN 1054-139X, <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2021.09.031>.

Fotografías

<https://mextrotter.com/es/Lexikon/queso-oaxaca/>



#ElPoderDeLaEducación



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLOGÍA
NACIONAL DE MÉXICO



GOBIERNO DEL
ESTADO DE
MÉXICO



ESTADO DE
MÉXICO
¡El poder de servir!

EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN



seduc.edomex.gob.mx

[/TESEeducativo](https://TESEeducativo)

[/taseeducativo](https://taseeducativo)

@TESEeducativo